



Modelado Computacional Cognitivo de la Adquisición de la Morfología Verbal.

Aplicación a la Caracterización y Diagnóstico de Trastornos Cognitivos.

TESIS DOCTORAL

Jesús Oliva Gonzalo

Ingeniero en Informática - Licenciado en Matemáticas

UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática

Departamento de Inteligencia Artificial

Madrid - 2013

UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática
Departamento de Inteligencia Artificial



Modelado Computacional Cognitivo de la Adquisición de la Morfología Verbal.

Aplicación a la Caracterización y Diagnóstico de Trastornos Cognitivos

Jesús Oliva Gonzalo

Ingeniero en Informática - Licenciado en Matemáticas

Trabajo dirigido por:

María Dolores del Castillo Sobrino

José Ignacio Serrano Moreno

Trabajo tutorizado por:

Francisco Javier Díez Vegas

Agradecimientos

De gente bien nacida es agradecer los beneficios que reciben, y uno de los pecados que más a Dios ofende es la ingratitud.

Miguel de Cervantes,
El ingenioso hidalgo Don Quijote de la Mancha.

En primer lugar he de dar las gracias a mis Directores: Lola y Nacho. Es algo que se suele decir habitualmente, pero en este caso es cierto: sin ellos este trabajo de Tesis no habría sido posible. En lo institucional he de agradecer al CSIC el apoyo que ha dado a este trabajo dentro del programa JAE. Además he de extender ese agradecimiento a todos mis compañeros del Centro de Automática y Robótica. En especial a Ángel, por aumentar la cantera de futuros investigadores del grupo y a Jaime, por su estricto tratamiento a base de criogénesis y almendras que me ha permitido mantenerme joven y fresco como una lechuga durante estos años. También he de dar las gracias a la gente que he conocido en mis estancias por el mundo. Todos han contribuido a que esas experiencias hayan sido extremadamente enriquecedoras tanto en lo laboral como en lo personal. Además he de dar las gracias al personal del Centro de Referencia Estatal de Discapacidad y Dependencia de San Andrés del Rabanedo y en particular a su directora, María Teresa Gutiérrez Fuentes así como a los participantes en el estudio del Alzheimer por su colaboración desinteresada en este trabajo. ¡Gracias!

En cuanto a mi familia, por respeto, empezaré por los mayores. A mis abuelos, Rosa, Paula, Valentín y Constantino, que apenas sabiendo leer y escribir hicieron lo que mejor sabían hacer: sembrar. Sembraron en mis padres una pequeña semilla de lo que hoy es este trabajo de tesis. A mis padres y mi tía, que además de saber leer y escribir perfectamente, dominan las técnicas de riego de huertos, plantas e incluso personalidades. Y, por supuesto a mi hermano, que no sabe nada de siembra ni riegos (e incluso a veces dudo de si sabe leer y escribir) pero siempre se le ha dado muy bien “*abonar*” el terreno con su ejemplo. ¡Gracias!

A mis amigos, ellos saben bien quienes son y lo mucho que tengo que agradecerles. Y, por supuesto, a Lorena por enseñarme su táctica y su estrategia, por no rendirse, por no salvarse...

De corazón, Gracias.

El educador mediocre habla.
El buen educador explica.
El educador superior demuestra.
El gran educador inspira.

William Arthur Ward.

Lola, Nacho, gracias por inspirarme.

Índice general

Resumen	1
Abstract	3
1. Introducción	5
1.1. Motivación	7
1.2. Metodología	10
1.3. Objetivos	11
1.4. Descripción de los capítulos	15
 I Modelado computacional cognitivo de la adquisición de la morfología verbal	
 2. La adquisición del lenguaje. Perspectivas teóricas y modelos computacionales	21
2.1. Conceptos lingüísticos relevantes	22
2.2. Adquisición del lenguaje. ¿nativismo o constructivismo?	23
2.3. Adquisición de la morfología verbal. ¿una o dos rutas?	27
2.3.1. El modelo Declarativo/Procedural	29
2.4. Modelado computacional de la adquisición de la morfología verbal	34
2.4.1. Modelos conexionistas	34
2.4.2. Modelos simbólicos	40
 3. Marco teórico para el modelado de la adquisición de la morfología verbal	45
3.1. Objetivo	45
3.1.1. Morfología verbal del inglés	46
3.1.2. Estudios empíricos sobre la adquisición de la morfología verbal inglesa	48
3.1.3. Morfología verbal del castellano	54
3.1.4. Estudios empíricos sobre la adquisición de la morfología verbal española	56

3.2. Metodología	61
3.2.1. ACT-R	61
3.2.2. Representación de la información lingüística en los <i>chunks</i> del modelo	66
3.2.3. Vocabulario	72
3.2.4. Procedimiento	75
4. Implementación y validación del modelo de adquisición de la morfología verbal	77
4.1. Modelo de adquisición de la morfología verbal	78
4.1.1. Suposiciones de partida	78
4.1.2. Percepción	79
4.1.3. Memoria declarativa	81
4.1.4. Memoria procedural	84
4.1.5. Parámetros del modelo	89
4.1.6. Dinámica del modelo	91
4.2. Experimento 1: Adquisición de la morfología verbal inglesa	97
4.2.1. Aprendizaje en forma de U	97
4.2.2. Errores típicos	98
4.2.3. Interacción frecuencia/regularidad	99
4.2.4. Generalización	100
4.3. Experimento 2: Adquisición de la morfología verbal castellana	103
4.3.1. Aprendizaje en forma de U	103
4.3.2. Errores típicos	106
4.3.3. Interacción frecuencia/regularidad	107
4.3.4. Generalización	108
4.4. Discusión general	109
II Aplicación a la caracterización y diagnóstico de trastornos cognitivos.	
5. Metodología de caracterización y diagnóstico de trastornos cognitivos	115
5.1. Caracterización y diagnóstico de trastornos cognitivos	116
5.1.1. Medidas de evaluación	117
5.2. Metodología para la caracterización y diagnóstico de trastornos cognitivos .	120
5.2.1. Detección de diferencias a nivel conductual	124
5.2.2. Modelado computacional cognitivo	125
5.2.3. Individualización de los parámetros del modelo	126

5.2.4. Aplicación de técnicas de aprendizaje automático	131
6. Caracterización del Trastorno Específico del Lenguaje	139
6.1. El Trastorno Específico del Lenguaje	140
6.1.1. Teorías existentes sobre el TEL	143
6.1.2. Caracterización y diagnóstico del TEL	144
6.2. Aplicación de la metodología propuesta al TEL	150
6.3. Detección de diferencias a nivel conductual	150
6.4. Modelado cognitivo	152
6.5. Individualización de los parámetros del modelo	153
6.5.1. Procedimiento	154
6.5.2. Resultados	157
6.6. Aplicación de técnicas de aprendizaje automático	157
6.6.1. Ponderación de atributos	159
6.6.2. Clasificación	162
6.6.3. Agrupamiento	168
6.7. Discusión general	173
7. Caracterización del Alzheimer	177
7.1. La Enfermedad de Alzheimer	178
7.1.1. La Enfermedad de Alzheimer y el lenguaje	179
7.1.2. Caracterización y diagnóstico de la EA	181
7.2. Aplicación de la metodología propuesta al Alzheimer	184
7.3. Detección de diferencias a nivel conductual	185
7.3.1. Sujetos	185
7.3.2. Diseño y procedimiento	186
7.3.3. Discusión	189
7.4. Modelado cognitivo	190
7.5. Individualización de los parámetros del modelo	191
7.5.1. Procedimiento	191
7.5.2. Resultados	193
7.6. Aplicación de técnicas de aprendizaje automático	193
7.6.1. Ponderación de atributos	195
7.6.2. Clasificación	198
7.7. Discusión General	205

8. Conclusiones	207
8.1. Recapitulación	207
8.2. Consecución de objetivos	210
8.3. Aportaciones	212
8.3.1. Modelado	212
8.3.2. Caracterización y diagnóstico	213
8.4. Trabajo futuro	214

Bibliografía	217
---------------------	------------

Apéndices

A. Paradigmas flexivos regulares del castellano	237
B. Parámetros del modelo ACT-R	239
C. Vocabulario de entrada al modelo	241
C.1. Vocabulario inglés	241
C.2. Vocabulario castellano	246
D. Morfología verbal en pacientes con posible Alzheimer: Materiales	261

Índice de figuras

2.1. Arquitectura del modelo de Rumelhart y McClelland [1986]	35
3.1. Curva de aprendizaje en forma de U	50
3.2. Interacción frecuencia/regularidad en el pasado del inglés en las tres etapas de desarrollo del estudio de van der Lely y Ullman [2001]	53
3.3. Generalización regular 3.3(a) e irregular 3.3(b) para los tres grupos de edad del estudio de van der Lely y Ullman [2001] (edades: 5;9, 6;11 y 7;11 respectivamente)	54
3.4. Generalización regular en castellano para los distintos grupos de edad del estudio de Pérez-Pereira [1989] (edades: 3;3, 4;8, 5;8 y 6;3 respectivamente)	60
3.5. Arquitectura de ACT-R	62
4.1. Ejemplo de <i>chunk</i> utilizado por el modelo.	81
4.2. Proceso de recuerdo. Modulación de las activaciones a largo plazo por la memoria de trabajo.	83
4.3. Mecanismos usados por el modelo.	86
4.4. Mecanismos usados por el modelo tras haber aprendido las reglas regulares.	88
4.5. Dinámica del modelo. Ejemplo 1: producción correcta.	91
4.6. Dinámica del modelo. Ejemplo 2: error por analogía fonológica.	93
4.7. Dinámica del modelo. Ejemplo 3: sobreaplicación de sufijo de la 1ª conjugación.	94
4.8. Dinámica del modelo. Ejemplo 4: irregularización.	96
4.9. Sobrerregularización y tasa de producción de verbos regulares del modelo (a) y de Eve, una de las niñas del estudio de Marcus et al. [1992] (b).	97
4.10. Interacción frecuencia/regularidad en el pasado del inglés en tres etapas de desarrollo distintas. Comparación de los resultados obtenidos por el modelo y por los niños del estudio de van der Lely y Ullman [2001]	101

4.11. Generalización regular 4.11(a) e irregular 4.11(b). Comparación de los resultados obtenidos por el modelo y por los niños del estudio de van der Lely y Ullman [2001] (edades: 5;9, 6;11 y 7;11 respectivamente)	102
4.12. Sobrerregularización y tasa de producción de formas regulares en el modelo (a) y en Maria, una de las niñas del estudio de Clahsen et al. [2002] (b). . .	104
4.13. Sobrerregularización y tasa de producción de formas regulares del modelo con formas de presente (a) y de pasado (b).	105
4.14. Generalización en castellano. Comparación de los resultados obtenidos por el modelo y por los niños del estudio de Pérez-Pereira [1989] (edades: 3;3, 4;8, 5;8 y 6;3 respectivamente)	109
5.1. Matriz de confusión para un clasificador binario.	117
5.2. Curvas ROC de distintos clasificadores binarios.	119
5.3. Esquema de la metodología de ayuda a la caracterización y al diagnóstico. .	121
5.4. Ejemplo de dendrograma	136
6.1. Orden promedio y desviación típica de cada uno de los atributos y de los dos grupos de atributos.	161
6.2. Resultados obtenidos por los distintos clasificadores con cada subconjunto de datos para cada una de las medidas de evaluación utilizadas.	166
6.3. Resultados obtenidos por los distintos clasificadores en términos de cada una de las medidas de evaluación usadas con cada uno de los subconjuntos de atributos.	167
6.4. Agrupamiento jerárquico de los individuos con TEL de la base de datos de Simon-Cereijido y Gutiérrez-Clellen [2007] usando el conjunto de atributos observables (6.4(a)) y el conjunto de atributos internos (6.4(b))	170
6.5. Valores normalizados de las coordenadas de los centroides de los tres grupos obtenidos en el agrupamiento.	171
7.1. Orden promedio y desviación típica de cada uno de los atributos y de los dos grupos de atributos.	197
7.2. Resultados obtenidos por los distintos clasificadores con cada subconjunto de datos para cada una de las medidas de evaluación utilizadas.	201
7.3. Resultados obtenidos por los distintos clasificadores en términos de cada una de las medidas de evaluación usadas con cada uno de los subconjuntos de atributos.	202

Índice de tablas

3.1. Fenómenos empíricos observados en la adquisición de la morfología verbal inglesa.	48
3.2. Distribución de los tipos de errores en el estudio de Marcus et al. [1992] . .	50
3.3. Tasas de sobrerregularización en verbos ingleses de diferentes frecuencias de uso (extraída de Maratsos [2000])	52
3.4. Ejemplo de la distribuciones de distintos patrones irregulares en varias formas del verbo ‘poner’	56
3.5. Fenómenos empíricos observados en la adquisición de la morfología verbal española.	56
3.6. Distribución de los tipos de errores en el estudio de Clahsen et al. [2002] . .	57
3.7. Tasas de sobrerregularización en verbos españoles de diferentes frecuencias de uso (extraída de Clahsen et al. [2002])	59
3.8. Proporción de aciertos en la generalización regular en castellano para los distintos grupos de edad del estudio de Pérez-Pereira [1989]	60
3.9. Representación de los 24 fonemas consonánticos del inglés.	68
3.10. Representación de los fonemas vocálicos del inglés	69
3.11. Representación de los fonemas consonánticos del castellano.	70
3.12. Representación de los fonemas vocálicos del castellano.	70
3.13. Fuentes de información lingüística utilizadas por el modelo	73
3.14. Distribución de regularidad y frecuencia en el vocabulario de entrada inglés. .	73
3.15. Distribución de regularidad y frecuencia por tiempos en el SVI.	74
4.1. Porcentajes de error en la producción de formas verbales inglesas. Comparación de los resultados obtenidos por el modelo y por los niños de los estudios de Marcus et al. [1992] y Xu y Pinker [1995].	99
4.2. Tasas de sobrerregularización de verbos ingleses de distintas frecuencias. Comparación de los resultados obtenidos por el modelo y por los niños del estudio de Maratsos [2000].	99

4.3. Porcentajes de error en la producción de formas verbales en español. Comparación de los resultados obtenidos por el modelo y por los niños del estudio de Clahsen et al. [2002].	107
4.4. Tasas de sobrerregularización en castellano para los distintos grupos de frecuencias. Comparación de los resultados obtenidos por el modelo y por los niños del estudio de Clahsen et al. [2002]	108
5.1. Técnicas de ponderación de atributos utilizadas.	133
6.1. Tabla resumen con los resultados del estudio de Simon-Cereijido y Gutiérrez-Clellen [2007].	147
6.2. Comparación de distintos modelos del lenguaje (LM) y técnicas de aprendizaje automático (ML) para el diagnóstico del TEL. Tabla extraída de Gabani et al. [2011]	149
6.3. Tasas de errores en la morfología verbal para el grupo de niños sanos (DT) y niños con probable TEL (TEL) obtenidas en el estudio de Simon-Cereijido y Gutiérrez-Clellen [2007].	152
6.4. Definición del espacio de búsqueda en la aplicación de la metodología al TEL. Atributos utilizados y rango de valores permitido.	155
6.5. Atributos utilizados en la aplicación de la metodología al TEL.	158
6.6. Ordenación de atributos dada por las distintas técnicas de ponderación de atributos utilizadas.	160
6.7. Orden promedio de cada grupo de atributos con las distintas técnicas de ponderación de atributos utilizadas en la aplicación de la metodología al TEL.	161
6.8. Sensibilidad, especificidad, tasa de probabilidad positiva, tasa de probabilidad negativa y AUC obtenidos con los 5 métodos y los 3 subconjuntos de atributos utilizados en la aplicación de la metodología al TEL.	164
6.9. Coordenadas de los centroides obtenidos por el algoritmo k-medias: valores medios y desviaciones estándar.	171
7.1. Resumen de las características de los grupos de participantes utilizados en el estudio de la morfología verbal en pacientes con posible Alzheimer.	186
7.2. Resultados del experimento sobre la morfología verbal en pacientes con posible Alzheimer (pEA) e individuos de control.	188
7.3. Definición del espacio de búsqueda en la aplicación de la metodología a la EA. Atributos utilizados y rango de valores permitido.	192
7.4. Atributos utilizados en la aplicación de la metodología a la EA.	194

7.5. Ordenación de atributos dada por las distintas técnicas de ponderación de atributos utilizadas.	196
7.6. Orden promedio de cada grupo de atributos con las distintas técnicas de ponderación de atributos utilizadas en la aplicación de la metodología a la EA.	198
7.7. Sensibilidad, especificidad, tasa de probabilidad positiva, tasa de probabilidad negativa y AUC obtenidos con los 5 métodos y los 3 subconjuntos de atributos utilizados en la aplicación de la metodología a la EA.	200
A.1. Paradigmas flexivos regulares del castellano en presente y pasado simple. . .	237
B.1. Parámetros utilizados para las simulaciones en Inglés y Castellano y valores promedio y desviaciones estándar para dichos parámetros en la base de datos de Wong et al. [2010].	239
C.1. Vocabulario utilizado en los experimentos en inglés.	241
C.2. Formas de presente simple utilizadas en los experimentos en castellano. . .	246
C.3. Formas de pasado simple utilizadas en los experimentos en castellano. . .	253

Lista de Símbolos, Abreviaturas y Siglas

α	Tasa de aprendizaje procedural.
γ_f	Nivel de ruido en la percepción y la interpretación fonológica.
$\gamma_f - dec$	Declive del nivel de ruido en la percepción y la interpretación fonológica.
γ_m	Nivel de ruido en la percepción y la interpretación morfológica.
$\gamma_m - dec$	Declive del nivel de ruido en la percepción y la interpretación morfológica.
ANS	Nivel de ruido en la activación. En inglés <i>Activation Noise S.</i>
BLL	Factor de olvido. En inglés <i>Base Level Learning.</i>
Conj-PM	Sensibilidad del modelo ante la característica de conjugación.
DGE	Déficit Gramatical Específico. En inglés <i>Grammar specific deficit</i> (GSD).
DP	Déficit de procesamiento. En inglés <i>Processing deficit</i> (PD).
EA	Enfermedad de Alzheimer. En inglés <i>Alzheimer Disease</i> (AD).
EGS	Nivel de ruido en la utilidad. En inglés <i>Expected Gain S.</i>
EOI	Extended Optional Infinitive.

HDP	Hipótesis del déficit procedural. En inglés <i>Procedural deficit hypothesis</i> (PDH).
Modelo DP	Modelo Declarativo/Procedural. En inglés <i>Declarative/Procedural Model</i> (DP model).
MTA-PM	Sensibilidad del modelo ante la característica de modo, tiempo y aspecto.
NP-PM	Sensibilidad del modelo ante la característica de número y persona.
PHON-PM	Sensibilidad del modelo ante las características fonológicas.
RT	Umbral de recuerdo. En inglés <i>Retrieval Threshold</i> .
TEL	Trastorno específico del lenguaje. En inglés <i>Specific Language Impairment</i> (SLI).

Resumen

Este trabajo de tesis se centra en el estudio de los procesos de adquisición y procesamiento de la morfología verbal y la aplicación directa de este estudio a la caracterización y la ayuda al diagnóstico de trastornos cognitivos. El trabajo se desarrolla teniendo como marco las Ciencias Cognitivas y como herramienta fundamental el modelado computacional cognitivo.

En primer lugar, este trabajo de investigación presenta un modelo computacional cognitivo de los procesos de adquisición de la morfología verbal. El objetivo de esta primera parte es ahondar en el conocimiento sobre los mecanismos y estructuras que subyacen a los procesos de adquisición de la morfología verbal. La morfología verbal representa un caso paradigmático del comportamiento general del lenguaje y, por tanto, las conclusiones obtenidas durante su estudio podrían ser extendidas, hasta cierto punto, a un ámbito más general. Para realizar ese estudio de los mecanismos y estructuras subyacentes se propone el uso del modelado computacional cognitivo por sus múltiples ventajas a la hora de aunar y hacer explícitas las teorías pertenecientes a distintas áreas dentro de las Ciencias Cognitivas. Una vez presentado el modelo, en esta tesis se propone una validación experimental comparando su comportamiento con el observado en los niños en distintos experimentos empíricos tanto en inglés como en castellano.

En la segunda parte de este trabajo se aborda la necesidad de métodos de diagnóstico adecuados para distintos trastornos cognitivos. La heterogeneidad y el solapamiento existente entre algunos trastornos cognitivos hacen que su diagnóstico y caracterización sean muy complicados. Los métodos utilizados actualmente suelen presentar tres limitaciones fundamentales. En primer lugar, estos métodos usan como única fuente de información ciertas observaciones conductuales. Dadas las características de heterogeneidad y solapamiento comentadas, el uso únicamente de información conductual puede no ser la opción más adecuada. Por otra parte, en muchos casos se trata de estudiar el perfil de comportamiento promedio en lugar de centrarse en las diferencias individuales y tratar de explicar

sus causas. De nuevo, dada la gran heterogeneidad, parece necesario un estudio individualizado de las causas que afectan a cada individuo y en qué grado afecta cada una de esas causas. Por último, las técnicas utilizadas en muchos casos para analizar esa información no son las más adecuadas por distintas razones. Por ejemplo, en muchos casos se trata de aplicar técnicas lineales en problemas no separables linealmente. Así pues, en este trabajo de Tesis se propone una metodología de ayuda a la caracterización y al diagnóstico de trastornos cognitivos no invasiva y de bajo coste, que trata de superar esas limitaciones. En primer lugar se propone el uso de información relativa a los procesos y estructuras que subyacen a cada uno de los perfiles de comportamiento y se propone el uso del modelado computacional cognitivo como herramienta para obtener esa información. En segundo lugar se propone la individualización de esa información frente al estudio del perfil promedio. Por último se propone el uso de técnicas de aprendizaje automático para obtener los mejores resultados a partir de esa información.

Con el objetivo de demostrar la utilidad de la metodología y su amplio rango de aplicación se propone su evaluación a través de dos casos concretos: el Trastorno Específico del Lenguaje (TEL) y la Enfermedad de Alzheimer (EA). En ambos casos los resultados confirman la utilidad de la metodología propuesta. Tanto la información obtenida a través del modelado computacional cognitivo como las técnicas de aprendizaje automático muestran su relevancia frente a las alternativas usadas comúnmente en la actualidad. La evaluación de la metodología en términos de caracterización y diagnóstico es también muy favorable. En cuanto a la caracterización, la metodología muestra resultados que pueden ser muy útiles para entender mejor las causas de un determinado trastorno y, por tanto, apoyar o refutar las distintas teorías existentes. En cuanto a la ayuda al diagnóstico, en los dos casos se han obtenido resultados por encima de los umbrales de aceptabilidad para un método de ayuda al diagnóstico. Además, la metodología propuesta ofrece un diagnóstico que va más allá del diagnóstico binario (afectado / no afectado) ofrecido por los métodos clásicos, dando una idea de las áreas afectadas en cada paciente y del grado de afectación de cada una de ellas. Estos dos resultados muestran la utilidad de la metodología presentada como método de ayuda al diagnóstico y al diseño de terapias personalizadas.

Abstract

This Thesis focuses on the theoretical study of verbal morphology acquisition and processing and the direct application of this study to the characterization and diagnosis support of cognitive disorders. The work was developed within the framework of Cognitive Sciences using computational cognitive modeling as main tool.

The first part of this work presents the design and implementation of a computational cognitive model of verbal morphology acquisition. The aim of this study is to deepen the understanding of the mechanisms and structures underlying the processes of acquisition of verbal morphology. Verbal morphology represents a paradigmatic case of the general behavior of language and, therefore, the conclusions obtained through its study could be extended to some extent, to general language processing. This study was carried out using a computational cognitive model because of its multiple advantages to join and make explicit many different theories coming from different areas of Cognitive Science. Once the model is presented, it is evaluated comparing its behavior with that observed in children in many different aspects of language both in English and Spanish.

The second part of this Thesis addresses the need for adequate characterization and diagnostic support methods for cognitive impairments. The heterogeneity and the overlap between some cognitive disorders make their diagnosis and characterization a very complicated task. The currently used methods usually have three fundamental limitations. First of all, these methods use as the sole source of information, certain behavioral observations. Given the conditions of heterogeneity and overlap of most of these impairments, the use of only behavioral information may not be the most suitable option. Secondly, in most cases, these methods try to study the average behavioral profile rather than focusing on the important individual differences and try to explain its causes. Again, given the existing heterogeneity, it seems necessary to make an individualized study of the causes that affect each individual and to what extent each of these causes affect to each individual. Finally, the techniques used to process that information are usually not best suited to exploit

the predictive power of that information. For example, in many cases linear techniques are used to face non-linearly separable problems. Hence, in this Thesis a non-invasive, low-cost methodology of characterization and diagnosis support is proposed to address all these limitations. The first limitation is overcome by using the information related to the processes and structures that underlie the observed behavioral profiles and computational cognitive modeling is proposed as the tool to get this information. The second limitation is overcome by individualizing that information attending to the particularities of each individual profiles instead of looking at the general average behavior. Lastly, the third limitation is overcome by using machine learning techniques to obtain the best results from that information.

Finally, this work proposes the evaluation of the methodology in two particular cases: Specific Language Impairment (SLI) and Alzheimer Disease (AD). In both cases, the results confirm the usefulness of the proposed methodology. Both the information obtained through computational cognitive modeling and machine learning techniques show their relevance as opposed to the existing alternatives. In terms of characterization, the methodology shows very useful to better understand the causes of each cognitive impairment leading, therefore, to support or refute existing theories. In terms of diagnosis, the results of the methodology were over the threshold commonly used to consider a diagnosis technique as acceptable. Moreover, the proposed methodology does not give a binary diagnosis in terms of *affected* / *unaffected*. Instead, it gives an idea of the affected areas in each patient and to what extent they are impaired. These two results show the potential of this methodology as a method to support the diagnosis and the design of individualized therapies.

Capítulo 1

Introducción

Desocupado lector, sin juramento me podrás creer que quisiera que este libro, como hijo del entendimiento, fuera el más hermoso, el más gallardo y más discreto que pudiera imaginarse. Pero no he podido yo contravenir al orden de naturaleza; que en ella cada cosa engendra su semejante. Y así, ¿qué podrá engendrar el estéril y mal cultivado ingenio mío [...]?

Miguel de Cervantes,
El ingenioso hidalgo Don Quijote de la Mancha.

El lenguaje ha sido y es objeto permanente de estudio. Desde las primeras teorías filosóficas acerca del lenguaje humano hasta los últimos avances en medidas de la actividad cerebral, gran cantidad de investigadores de distintas áreas han centrado sus esfuerzos en tratar de entender cómo funciona el lenguaje humano. Sin embargo, los procesos cognitivos involucrados tanto en la adquisición como en el procesamiento del lenguaje natural siguen siendo un misterio. Una de las claves para que se mantenga el misterio puede ser que, durante siglos, se ha tratado de investigar el lenguaje desde múltiples puntos de vista diferentes pero siempre únicos. La Filosofía, la Lingüística, la Psicología o la Neurología entre otras disciplinas han tratado de arrojar luz a este misterio. Sin embargo, como dijo la Académica Margarita Salas para concluir su discurso de ingreso en la Real Academia de la Lengua Española:

[...] la asombrosa proeza del lenguaje es demasiado compleja para ser comprendida con las herramientas de una única especialidad académica o médica. Sin duda, la contribución de varias disciplinas al estudio de los procesos neuronales fundamentales pueden dar lugar a importantes avances en el futuro que nos permitan responder a las numerosas preguntas aún existentes relacionadas con el lenguaje y su genética.

Por tanto, el enfoque multidisciplinar que proponen las ciencias cognitivas (y que trata de adoptarse en cierta medida en este trabajo de tesis) puede ser una de las claves para desentrañar tal misterio. Sin embargo, la tarea de aunar las teorías y conclusiones obtenidas en áreas tan distintas como las citadas anteriormente puede ser extremadamente ardua. En muchos casos, las teorías propuestas en distintos ámbitos no son compatibles puesto que tienen en cuenta distintas variables o fuentes de información. Además, en ocasiones, los enfoques teóricos no son suficientemente explícitos y los datos empíricos pueden apuntar en direcciones a primera vista diferentes e incluso opuestas. De ahí la necesidad de utilizar alguna herramienta que facilite esta tarea de recopilación y permita integrar las distintas teorías que pueden surgir desde distintos ámbitos.

Desde mediados de los años 70 [Boden, 1988] hasta nuestros días, el modelado computacional cognitivo se ha revelado como una herramienta extremadamente útil para aunar y hacer explícitas las teorías que se derivan de áreas muy distintas. Las ventajas del modelado computacional cognitivo son muchas [Lewandowsky, 1993]. Su interés reside no sólo en la resolución de una tarea concreta sino en el estudio de cómo se resuelve. Es decir, todo modelo computacional cognitivo trata no sólo de imitar el comportamiento humano en una determinada tarea, también ha de explicar los mecanismos de procesamiento de información que subyacen a ese comportamiento. Por tanto, una de las primeras ventajas del modelado computacional cognitivo es que obliga a especificar de forma precisa gran cantidad de detalles que podrían estar de alguna forma difusos en un enfoque puramente teórico. Las representaciones, variables y mecanismos utilizados han de tener una definición exacta para ser implementados en un modelo computacional. De este modo se evitan las inconsistencias que podrían derivarse de una teoría imprecisa. Por otra parte, los modelos computacionales permiten extraer nuevas implicaciones de una teoría dada. En cada proceso cognitivo intervienen gran cantidad de variables y mecanismos. Este hecho hace muy difícil que un enfoque puramente teórico sea capaz de predecir todos los efectos derivados de las múltiples interacciones entre esas variables. Sin embargo, la capacidad de procesamiento de un ordenador permite analizar estas complejas interacciones y observar sus efectos dando lugar a nuevas predicciones que pueden corroborar o desmontar ciertas teorías. Por último, el modelado computacional es también de gran utilidad para examinar comportamientos anormales y tratar de explicar sus causas así como para realizar experimentos en condiciones extremas que de otra forma no sería posible (o ético) realizar.

En definitiva, la interacción entre un enfoque interdisciplinar que permita realizar hipótesis más profundas acerca de los mecanismos que gobiernan el lenguaje y la imple-

mentación explícita de dichas hipótesis mediante el modelado computacional cognitivo es una vía muy prometedora que podría ayudar a desentrañar el misterio del lenguaje.

1.1. Motivación

Este trabajo de tesis surge con una vocación tanto teórica como práctica. Las raíces de este trabajo se encuentran en el interés personal por conocer el funcionamiento del cerebro y, en particular, el funcionamiento de los procesos cognitivos relacionados con el lenguaje. El estudio del lenguaje es, en gran parte, el estudio del ser humano en sí mismo. El lenguaje es, posiblemente, la capacidad más puramente humana del ser humano. Aspectos de sus orígenes, su evolución y de su desarrollo actual están fielmente reflejados en el lenguaje. De este modo, el estudio del lenguaje supone a la vez un gran reto y una gran motivación. Por otra parte, el estudio del lenguaje supone una ventana hacia el estudio del funcionamiento general del cerebro. Muchas de las estructuras y procesos involucrados en el procesamiento del lenguaje son compartidos por varias capacidades cognitivas. De ahí que la investigación del lenguaje permita ampliar el conocimiento general acerca del funcionamiento de nuestro cerebro. Por tanto, el estudio de los procesos cognitivos involucrados en el procesamiento del lenguaje a distintos niveles y desde distintos puntos de vista, incluido el del modelado computacional cognitivo, tiene un innegable interés inherente y supone una motivación extraordinaria.

En el ámbito teórico son varias las preguntas que han motivado esta tesis: ¿Cómo adquirimos los seres humanos el lenguaje? Los seres humanos aprendemos a hablar de forma casi milagrosa. La adquisición del lenguaje se da en un entorno ruidoso y con información incompleta, sin ningún tipo de instrucciones explícitas y sin apenas correcciones por parte de los adultos [Pinker, 1984]. Más aún, este proceso tan natural y a la vez tan sorprendente se da independientemente de las particularidades estructurales del idioma adquirido. Esto conduce a la siguiente pregunta: ¿Cómo se da el proceso de adquisición en diferentes lenguajes? Los más de 6000 idiomas hablados en el mundo presentan diferencias muy significativas en los niveles fonético, morfológico, sintáctico y semántico. Sin embargo, cualquier bebé es capaz de aprender cualquier idioma al que sea expuesto. En particular, la adquisición de la morfología verbal ha sido ampliamente estudiada por su relativa simplicidad y la posibilidad de extender las conclusiones extraídas a la adquisición y procesamiento del lenguaje en general. Sin embargo, a pesar de la gran cantidad de atención que ha recibido este fenómeno, aún no está claro su funcionamiento ni siquiera en uno de los casos más simples, el del inglés. Este hecho unido a la última pregunta mencionada motivó especialmente el estudio de los procesos de adquisición de la morfología verbal

desde el punto de vista de idiomas muy diferentes. Además, como se ha comentado en la introducción, el modelado computacional cognitivo puede ser una herramienta muy útil para, integrando los resultados e hipótesis provenientes de áreas muy distintas, tratar de dar una explicación a los mecanismos involucrados en la adquisición y procesamiento del lenguaje. De este modo el diseño y desarrollo de un modelo computacional cognitivo capaz de adquirir la morfología verbal en distintos idiomas se convirtió en uno de los objetivos de esta tesis.

Estas preguntas y muchas otras han sido uno de los motores fundamentales de esta tesis. Sin duda, el estudio teórico de los mecanismos cognitivos involucrados en la adquisición y procesamiento del lenguaje natural supone una motivación más que suficiente. Sin embargo, las motivaciones de este trabajo no se ciñen únicamente a dicho estudio teórico. Las aplicaciones que podría tener este trabajo en el ámbito socio-sanitario han sido también un motor de esta tesis desde un principio. En este sentido, la ayuda a la caracterización y al diagnóstico de trastornos cognitivos es a la vez un objetivo y una motivación importante para este trabajo de tesis. En la mayoría de los casos, un diagnóstico correcto y temprano es clave para atenuar la discapacidad. Además, una correcta caracterización individual del trastorno es vital en el diseño de terapias personalizadas mucho más eficaces. De ahí la necesidad de encontrar métodos más efectivos de ayuda a la caracterización y al diagnóstico de trastornos cognitivos tanto con carácter general como particularizando en cada paciente. El hecho de que las condiciones de vida de una sola persona pudiesen mejorar gracias a la aplicación de este trabajo en el ámbito clínico es, sin lugar a dudas, la mayor de las motivaciones.

La caracterización y el diagnóstico de muchos trastornos cognitivos es muy complicada debido a dos factores clave: la heterogeneidad existente en los perfiles de comportamiento dentro de un mismo trastorno y el solapamiento existente entre distintos trastornos. Estos dos factores motivan el uso del modelado computacional cognitivo y de distintas técnicas de aprendizaje automático y de aprendizaje automático. A día de hoy, los métodos de caracterización y diagnóstico de muchos trastornos cognitivos presentan grandes limitaciones puesto que sólo usan un conjunto de variables de comportamiento [Leonard, 1998]. Dadas las condiciones comentadas de heterogeneidad y solapamiento, la mera observación del comportamiento parece no ser suficiente. Sin embargo, teniendo algún tipo de conocimiento sobre los mecanismos que subyacen a cada perfil de comportamiento es posible que se pudieran mejorar tanto la caracterización como el diagnóstico del trastorno cognitivo estudiado. En este sentido son también varias las preguntas que surgen: ¿cuáles son las causas que provocan un determinado trastorno? La respuesta a esta pregunta su-

pondría un conocimiento mayor de cada uno de los trastornos cognitivos estudiados, con la consiguiente mejora que esto aportaría tanto al diagnóstico como al tratamiento de esos trastornos. Como ya se ha señalado, el modelado computacional cognitivo puede ser una potente herramienta para obtener información sobre los mecanismos que subyacen a determinados comportamientos tanto normales como deficitarios. Sin embargo, la clasificación de cada uno de los casos a partir de esa información puede seguir siendo muy complicada. De ahí la necesidad del uso de técnicas de aprendizaje automático y aprendizaje automático que sean capaces de diferenciar los distintos casos a partir de la información obtenida por el modelo computacional cognitivo. Por otra parte, dada la gran variabilidad que, como se ha comentado, presentan muchos de estos trastornos surge inmediatamente la pregunta de ¿en qué medida afecta cada una de las causas de un trastorno cognitivo a un determinado individuo? Conocer la influencia de cada una de esas causas y factores en cada individuo permitiría individualizar las terapias generales adaptándolas al perfil cognitivo de cada paciente, con la posible mejora de los resultados de dichas terapias. Este hecho justifica el modelado del individuo que se llevará a cabo en este trabajo de tesis frente a la búsqueda de un patrón general de comportamiento que explique cada uno de los trastornos en su conjunto. Finalmente, resulta interesante preguntarse sobre la generalidad del modelo computacional cognitivo y la metodología propuestos. La adquisición y procesamiento del lenguaje es un proceso complejo en el que intervienen gran cantidad de estructuras o subprocesos que, a su vez, intervienen en muchos otros procesos. Por tanto, el procesamiento del lenguaje puede servir, en cierto modo, como un termómetro que mide el estado de salud de esas estructuras y mecanismos subyacentes. Si alguno de esas estructuras o mecanismos está dañado en un determinado trastorno cognitivo es posible que se observen ciertos errores en el procesamiento del lenguaje. Quizás incluso antes de que el trastorno cognitivo en sí pueda ser diagnosticado. Este hecho junto con la necesidad de demostrar la generalidad de la metodología propuesta en esta tesis, condujeron a aplicar el modelo y la metodología a la caracterización y la ayuda al diagnóstico de la Enfermedad de Alzheimer.

Todas las preguntas que se han planteado en los párrafos anteriores son las que motivan y dan sentido a esta tesis. Las inquietudes iniciales por conocer cómo adquirimos los seres humanos el lenguaje y cómo aplicar ese conocimiento para mejorar la calidad de vida de las personas han sido continuamente renovadas y, aún más, ampliadas. Las respuestas que se han ido encontrando durante el desarrollo de este trabajo no han servido sino para plantear nuevas preguntas que han conseguido mantener la motivación y hacer de este trabajo de investigación un trabajo excitante, apasionante y tremendamente enriquecedor.

1.2. Metodología

Como ya se ha comentado, esta tesis tiene una vertiente teórica, la del modelado, y una vertiente práctica, la de aplicación del modelo. El proceso de modelado computacional ha de seguir tres etapas que responden a estas tres preguntas: ¿Qué se quiere modelar? ¿Cómo se va a modelar? ¿Qué conclusiones se pueden extraer a partir de los resultados? Para contestar a estas preguntas en este trabajo de tesis se han realizado las siguientes subtareas:

- ¿Qué se quiere modelar? En este trabajo se modelará el proceso de adquisición de la morfología verbal tanto en castellano como en inglés. Para ello se llevarán a cabo las siguientes subtareas en cada uno de los idiomas estudiados:
 - Análisis de los datos empíricos existentes.
 - Determinación de los fenómenos empíricos a modelar.
 - Determinación del vocabulario de entrada al modelo.
- ¿Cómo se va a modelar? Se construirá un modelo computacional sobre una arquitectura cognitiva existente. La implementación del modelo se llevará a cabo mediante tres subtareas:
 - Elección de la arquitectura cognitiva sobre la que trabajar.
 - Determinación de la información lingüística utilizada como entrada al modelo.
 - Diseño e implementación de los mecanismos internos del modelo.
- ¿Qué conclusiones se pueden extraer a partir de los resultados? Se analizarán los resultados con el objetivo de validar el modelo y obtener predicciones e incluso nuevas hipótesis. Para ello se definen tres subtareas:
 - Análisis cuantitativo y cualitativo comparando los resultados obtenidos con los resultados empíricos.
 - Extracción de predicciones a partir del modelo acerca de fenómenos empíricos que aún no han sido comprobados.
 - Formulación de nuevas hipótesis en base a los resultados obtenidos.

La parte práctica de este trabajo de tesis consiste en el diseño de una metodología de ayuda a la caracterización y al diagnóstico de trastornos cognitivos y su aplicación a dos casos concretos: el Trastorno Específico del Lenguaje (TEL) y la Enfermedad de Alzheimer (EA). Las subtareas en las que se divide el desarrollo de esta parte son las siguientes:

- Diseño de una metodología de ayuda a la caracterización y al diagnóstico de trastornos cognitivos. Para ello se tendrán en cuenta dos factores clave:
 - Atender a la generalidad. Análisis de las características generales y la problemática en el diagnóstico de múltiples trastornos cognitivos.
 - Atender a la individualización. Análisis de las diferencias individuales que presenta cada uno de los trastornos estudiados.
- Aplicación de la metodología. Se aplicará la metodología a los casos del Trastorno Específico del Lenguaje y la Enfermedad de Alzheimer atendiendo a los siguientes pasos:
 - Determinación de la tarea o tareas a modelar en cada uno de los casos en los que se aplicará la metodología propuesta.
 - Modelado computacional cognitivo de la tarea o tareas elegidas en el punto anterior.
 - Determinación del método de optimización de parámetros para la individualización del diagnóstico.
 - Aplicación de distintas técnicas de aprendizaje automático para la ayuda a la caracterización y al diagnóstico.
 - Técnicas de selección de atributos con el fin de comprobar qué parámetros del modelo son más informativos en cada caso.
 - Técnicas de clasificación automática para la tarea de ayuda al diagnóstico.
 - Técnicas de agrupamiento para la caracterización y la validación de las teorías existentes.
 - Análisis de los resultados determinando cómo se adecuan a ellos las teorías existentes acerca de cada uno de los trastornos.

1.3. Objetivos

Como se ha comentado comentado, el modelado computacional cognitivo puede ser una herramienta fundamental para conseguir dos objetivos: en el ámbito teórico, obtener información precisa sobre los mecanismos y estructuras involucrados en distintos procesos cognitivos y en el ámbito de aplicación, usando esa información, facilitar la caracterización y el diagnóstico de distintos trastornos cognitivos. A partir de esta idea surge la hipótesis inicial de este trabajo de tesis: la información relativa a los procesos que subyacen a un determinado trastorno tiene una mayor capacidad informativa y discriminatoria que la

información obtenida a través de la mera observación del comportamiento. A raíz de esta hipótesis de partida surgen dos hipótesis secundarias:

- El modelado computacional cognitivo es una herramienta adecuada para conseguir dicha información.
- Las técnicas de aprendizaje automático son más adecuadas que las técnicas clásicas de análisis para analizar dicha información.

De este modo, manteniendo en mente esta hipótesis inicial, y con el objetivo final de corroborarla, este trabajo de tesis tiene dos objetivos principales: por una parte, profundizar en el conocimiento teórico acerca de los procesos de adquisición, almacenamiento y procesamiento del lenguaje. Por otra parte, se pretende aplicar ese conocimiento adquirido para desarrollar un sistema de ayuda a la caracterización y al diagnóstico individualizados. En concreto se pretende diseñar y desarrollar un modelo computacional cognitivo de los procesos de adquisición de la morfología verbal y utilizar dicho modelo como parte de una nueva metodología general de ayuda al diagnóstico y caracterización de trastornos cognitivos. El objetivo de la metodología propuesta es tratar de extraer las diferencias en el nivel cognitivo que se derivan de las diferencias observadas en el nivel conductual en una determinada tarea. Y, en particular, obtener las diferencias existentes entre individuos sanos e individuos afectados por el trastorno. Una vez obtenidas esas diferencias en el nivel cognitivo, éstas serán utilizadas por distintas técnicas de aprendizaje automático para la mejora de la caracterización y el diagnóstico.

Estos objetivos generales se concretan a continuación:

1. **Desarrollo de un modelo computacional cognitivo de la adquisición de la morfología verbal** y extracción de conclusiones en el ámbito teórico que permitan comprobar las hipótesis existentes tanto de desarrollo normal como de algunos trastornos. Con el objetivo de que el modelo tenga valor real y las conclusiones obtenidas sean fiables, ha de cumplir una serie de requisitos:

- *Ajuste a los datos*: Todo modelo computacional cognitivo ha de tratar de dar explicación, en mayor o menor medida, a los datos recogidos empíricamente.
- *Transparencia*: Los mecanismos que dan lugar al comportamiento del modelo han de ser fácilmente comprensibles. Un modelo capaz de ajustarse perfectamente a los datos observados carece de valor si sus mecanismos internos no quedan claros. La utilidad de ese modelo sería prácticamente nula puesto que

si no se identifican las causas que provocan un determinado comportamiento resulta imposible caracterizarlo.

- *Plausibilidad psicológica*: Los mecanismos y procesos propuestos han de ser consistentes con lo que se sabe en relación al fenómeno estudiado y a otros fenómenos cognitivos relacionados. Cuanto mayor sea la plausibilidad psicológica del modelo, mayor será la utilidad de la información extraída para el desarrollo de métodos de ayuda a la caracterización y al diagnóstico individualizados. Es decir, cuanto mejor represente el modelo los mecanismos y estructuras involucrados en la adquisición de la morfología verbal, mejores serán los resultados de la metodología en términos de caracterización y diagnóstico.
- *Generalidad*: El valor del modelo aumenta indudablemente cuanto mayor sea el número de lenguajes en los que es capaz de explicar un determinado fenómeno. Así pues, se plantea como objetivo el desarrollo de un modelo capaz de explicar los procesos de adquisición en Inglés y Castellano.
- *Flexibilidad*: El modelo ha de ser lo suficientemente flexible como para adecuar sus parámetros a los distintos comportamientos observados, tanto normales como deficitarios, y a las distintas teorías que tratan de explicar un determinado trastorno con el fin de poder comprobar las predicciones de cada una de ellas.

2. Presentación de una metodología de caracterización y ayuda al diagnóstico de trastornos cognitivos no invasiva y de bajo coste. La metodología ha de cumplir los siguientes requisitos:

- *Generalidad*: La metodología de caracterización y ayuda al diagnóstico no debe ser diseñada para una tarea específica o para un trastorno cognitivo en concreto.
- *Personalización*: La metodología ha de caracterizar y ayudar al diagnóstico de cada uno de los trastornos particularizando en las peculiaridades de cada individuo. Como se ha señalado antes, la heterogeneidad de muchos trastornos cognitivos es un punto clave. De ahí que una caracterización y diagnóstico individualizado sea vital para el diseño y desarrollo de terapias también individualizadas.

3. Aplicación de dicha metodología a la caracterización y la ayuda al diagnóstico de trastornos cognitivos. Se pretende avalar la validez tanto del modelo como de la metodología y así, llegar a comprobar la hipótesis de partida.

- Se aplicará la metodología presentada a un trastorno “puramente” del lenguaje. El Trastorno Específico del Lenguaje.

- Con el objetivo de demostrar la generalidad de la metodología, se aplicará a un trastorno no relacionado directamente con el lenguaje: la Enfermedad de Alzheimer.
 - Recogida y análisis de datos empíricos. Dada la falta de datos sobre el procesamiento de la morfología verbal en pacientes con posible Alzheimer, se diseñará y aplicará un experimento para la recogida de dichos datos.
 - Adaptación del modelo a la edad adulta y aplicación de la metodología propuesta.

1.4. Descripción de los capítulos

En el siguiente capítulo se recoge un repaso al estado de la técnica en el área del modelado computacional de la adquisición de la morfología verbal. El objetivo es recopilar los conocimientos básicos necesarios para el posterior desarrollo del trabajo presentado. En primer lugar se comentan los orígenes del debate sobre la adquisición del lenguaje humano y cómo este debate evolucionó para dar lugar a la discusión sobre la adquisición de la morfología verbal. A continuación se presentan las dos principales teorías que han surgido en torno a ese debate: las teorías de una ruta y las teorías de dos rutas y, dentro de estas últimas, se detalla especialmente el modelo Declarativo/Procedural, uno de los modelos teóricos de doble ruta más influyente y en el que se basa el trabajo de modelado de esta tesis. Posteriormente se presentan los modelos computacionales que han implementado cada una de estas teorías. Para cada una de las teorías se analizan las características generales de los modelos computacionales que las implementan y, a continuación, se hace un repaso de los modelos más influyentes hasta la fecha. Este repaso cronológico se inicia con los modelos de adquisición de la morfología verbal y finaliza con los modelos más recientes de adquisición de la morfología verbal en sistemas más complejos. Por último, en la sección 2.3.1 se presenta el modelo Declarativo/Procedural,

El capítulo 3 trata de establecer el marco teórico sobre el que se implementará el modelo computacional cognitivo presentado en el siguiente capítulo. En primer lugar se fijan los objetivos del experimento de modelado tanto en inglés como en castellano. Se explican las particularidades de los sistemas morfológicos de ambos idiomas y, a continuación, se comentan los patrones de desarrollo observados en los niños hablantes de esos dos idiomas y que se tratarán de reproducir con el modelo computacional. Posteriormente, se comenta la metodología seguida en estos experimentos. Se da una introducción a ACT-R, la arquitectura cognitiva sobre la que se ha desarrollado el modelo y se detallan las representaciones de la información utilizadas por el modelo y el procedimiento seguido en cada uno de los experimentos.

En el capítulo 4 se presenta el modelo computacional cognitivo de adquisición de la morfología verbal y su validación experimental. En primer lugar se da una amplia descripción del modelo comentando las simplificaciones realizadas y las características de cada uno de sus elementos y se dan ejemplos concretos de su dinámica. Por último se muestran, analizan y discuten los resultados obtenidos en los experimentos de adquisición de la morfología verbal inglesa y castellana, comparándolos con los comportamientos observados empíricamente.

A continuación comienza la segunda parte de esta tesis: la aplicación del modelo a la caracterización y la ayuda al diagnóstico de trastornos cognitivos. El capítulo 5 presenta la metodología de ayuda a la caracterización y al diagnóstico de trastornos cognitivos propuesta en este trabajo de tesis. En primer lugar se resume la problemática existente en torno a la caracterización y diagnóstico de trastornos cognitivos y se presenta la propuesta de este trabajo de tesis: la utilización, no sólo de las variables conductuales, sino también de las variables extraídas a partir de un modelo computacional cognitivo y el uso de esa información con diferentes técnicas de aprendizaje automático para la ayuda a la caracterización y al diagnóstico. Cada una de las cuatro etapas propuestas se detalla de forma independiente haciendo hincapié en los puntos que contribuyen a los dos requisitos principales que ha de cumplir: la generalidad y la personalización. Así mismo, se detalla cómo cada una de las etapas trata de superar las limitaciones de los métodos actuales. El uso únicamente de variables conductuales es superado mediante el uso del modelo computacional y sus parámetros internos. La etapa de individualización pretende centrar la atención de la metodología en las diferencias individuales frente al estudio del comportamiento promedio que llevan a cabo los métodos actuales y el uso de técnicas de aprendizaje automático pretende mejorar las técnicas de análisis y procesamiento de la información hasta la fecha.

En el capítulo 6 se muestra la aplicación de la metodología presentada en el capítulo anterior al caso concreto del Trastorno Específico del Lenguaje (TEL). El objetivo es demostrar la validez de la metodología como ayuda al diagnóstico y la caracterización de trastornos cognitivos, en particular, de trastornos del lenguaje. Para empezar, se hace un repaso a la problemática existente en torno a la caracterización y el diagnóstico del TEL. Se comentan las teorías que tratan de explicar el trastorno y los métodos utilizados a día de hoy para su diagnóstico, analizando las carencias de cada uno de ellos que motivan este trabajo de tesis. A continuación, cada una de las etapas de la metodología propuesta es comentada en detalle para, finalmente, mostrar y analizar los resultados relativos a la caracterización y diagnóstico del TEL. De forma similar, en el Capítulo 7 se aborda la problemática de la caracterización y el diagnóstico de la EA siempre desde el punto de vista del lenguaje, haciendo un repaso de los métodos de diagnóstico del Alzheimer prestando especial atención a aquellos que usan información lingüística en sus distintas formas. A continuación se comenta cómo se ha aplicado cada una de las etapas de la metodología y se hace un análisis detallado de los resultados obtenidos.

Finalmente, el capítulo 8 recoge las conclusiones de este trabajo de tesis, centrándose en el análisis de la consecución de los objetivos propuestos, un resumen de las aportaciones

de esta tesis y un repaso a las líneas de investigación que este trabajo deja abiertas para el futuro.

El apéndice A presenta un extracto de los paradigmas flexivos regulares del castellano. El apéndice B recoge los valores de los parámetros utilizados por el modelo computacional así como su comparación con los valores medios usados en distintos modelos de ACT-R. El apéndice C recoge el vocabulario de entrada al modelo tanto en inglés como en castellano y por último el apéndice D muestra los materiales completos utilizados en el experimento relativo a la morfología verbal en pacientes con posible Alzheimer.

Parte I

Modelado computacional cognitivo de la adquisición de la morfología verbal

La adquisición del lenguaje. Perspectivas teóricas y modelos computacionales



Mafalda, personaje creado por Quino.

En este capítulo se presenta el marco teórico general en el que se desarrolla la primera parte de este trabajo de tesis. El objetivo es recopilar y estructurar los conocimientos básicos necesarios para el posterior desarrollo del trabajo presentado. En primer lugar, en la sección 2.1 se hace un repaso a los conceptos lingüísticos básicos utilizados en esta tesis. A continuación, en la sección 2.2 se comentan los orígenes del debate sobre la adquisición del lenguaje humano y cómo este debate evolucionó para dar lugar a la discusión sobre la adquisición de la morfología verbal. En la sección 2.3 se comentan las dos principales teorías que se han presentado en torno a ese debate: las teorías de una ruta o teorías conexionistas y las teorías de dos rutas o teorías simbólicas y, dentro de éstas últimas, se detalla especialmente el modelo Declarativo/Procedural, uno de los modelos teóricos de doble ruta más influyente y en el que se basa el trabajo de modelado de esta tesis. En la sección 2.4 se presenta una revisión de los modelos computacionales existentes. Para cada una de las teorías se analizan las características generales de los modelos computacionales que las implementan y, a continuación, se hace un repaso de los modelos más influyentes hasta la fecha. Este repaso cronológico se inicia con los modelos de adquisición de la morfología verbal inglesa y finaliza con los modelos más recientes de adquisición de la morfología verbal en sistemas más complejos.

2.1. Conceptos lingüísticos relevantes

A lo largo de este trabajo de tesis se hará referencia a algunos conceptos lingüísticos que es conveniente manejar para comprender en profundidad este trabajo. A continuación se presentan una serie de definiciones adaptadas de Fromkin et al. [2010].

Una *palabra* es definida habitualmente como una cadena de caracteres o sonidos asociados con un significado concreto. Las palabras tienen una estructura interna. Están formadas por unidades de significado elementales, llamadas *monemas*. Existen dos tipos de monemas: lexemas y morfemas. Los *lexemas* portan la mayor parte del significado de la palabra mientras que los morfemas modifican o matizan ese significado. A su vez, los morfemas se dividen en dos tipos: morfemas derivativos y morfemas flexivos. Los *morfemas derivativos* modifican el significado del lexema añadiendo algún matiz (por ejemplo el prefijo *in-* indica negación del significado del lexema *creíble* - *increíble*) o producen una palabra que pertenece a otra clase gramatical (por ejemplo, el sufijo *-ación* convierte un verbo en un sustantivo: *preparar* - *preparación*). Por su parte, *los morfemas flexivos* son aquellos que añaden ciertas características gramaticales al lexema sin modificar su significado ni su categoría gramatical. Por ejemplo, el sufijo *-ábamos*, añadido a un verbo de la primera conjugación, indica primera persona, número plural, tiempo pretérito, aspecto imperfectivo y modo indicativo: *cantar* - *cantábamos*. En este tipo de morfemas y en las formas de combinarlos (descrita por la llamada *morfología flexiva*) es en los que se centra este trabajo.

Las características gramaticales verbales utilizadas a lo largo de este trabajo son:

- **Modo:** El modo es la categoría verbal que expresa las actitudes que asume el emisor ante la acción expresada por el verbo. En castellano existen tres modos: indicativo, subjuntivo e imperativo. El modo indicativo presenta un hecho como real; el modo subjuntivo expresa un deseo, una posibilidad o una duda; y el modo imperativo, una orden, una invitación o un consejo.
- **Tiempo:** El tiempo verbal indica el momento en que se da la acción expresada por el verbo: presente, pasado o futuro.
- **Aspecto:** La función del aspecto es señalar si la acción expresada por el verbo ha sido finalizada o no en el instante de referencia indicado en la oración. En castellano existen aspecto perfectivo (acción concluida) e imperfectivo (acción no concluida).
- **Número:** Es la categoría verbal que indica si la acción expresada por el verbo es realizada por uno (número singular) o varios agentes (número plural).

- Persona: La persona gramatical indica si el sujeto de la acción expresada por el verbo es el hablante (1ª persona), el oyente (2ª persona) o la persona de quién se habla (3ª persona)

Es importante resaltar que mientras que en castellano todas estas características gramaticales son marcadas por los sufijos verbales, en inglés, los sufijos verbales no reflejan la mayoría de ellas. Las únicas características marcadas para el sistema inglés son:

- Tiempo: Tan sólo se marca el tiempo pasado de las formas regulares (sufijo *-ed*)
- Aspecto: Tan sólo se marca el aspecto imperfectivo o continuo (sufijo *-ing*)
- Número y persona: Tan sólo se marcan en el caso de la 3ª persona del singular del presente simple (sufijo *-s*)

2.2. Adquisición del lenguaje. ¿nativismo o constructivismo?

¿Cómo adquirimos los seres humanos el lenguaje? Sin duda, ésta ha sido una de las preguntas más recurrentes en el ámbito de la Filosofía, la Lingüística o las Ciencias Cognitivas. Cualquier niño es capaz de adquirir el lenguaje al que es expuesto. Este aprendizaje se lleva a cabo sin instrucciones explícitas, en un ambiente ruidoso y sin recibir apenas correcciones por parte de sus padres [Brown y Hanlon, 1970]. Algunas otras especies son capaces de adquirir ciertas capacidades comunicativas. Las abejas son capaces de comunicar con su vuelo la dirección en la que se encuentra el néctar, a qué distancia está y la calidad del mismo. El canto de las ballenas muestra cierto comportamiento gobernado con reglas e incluso algunos primates (como los titís) son capaces de adquirir gramáticas simples. Sin embargo, estas capacidades no son comparables con el lenguaje humano puesto que todas ellas carecen de una característica clave: la recursividad. Por otra parte, existen algunos casos de niños que han crecido sin estar en contacto con ningún tipo de lenguaje [Fromkin et al., 2000]. Estos niños nunca han conseguido dominar el idioma al que posteriormente han sido expuestos a pesar de recibir instrucciones explícitas y correcciones. Por tanto, resulta evidente que el lenguaje humano tiene ciertas características especiales y su adquisición depende tanto del entorno como de la genética. Gran parte de la atención se ha centrado en el grado de influencia de estos dos factores. Parece obvio que el significado de las palabras no es innato. Es difícil imaginar que los humanos nazcamos conociendo el significado de palabras como *execrable* o *entelequia*. Del mismo modo, es ampliamente admitido que las reglas de la gramática tampoco están codificadas en nuestro genoma

[Pinker, 1994]. Sin embargo, sí que se han encontrado similitudes estructurales en todos los lenguajes, lo cual sugiere que existe una base genética para el lenguaje [Pinker, 1994]. En este debate en torno a la influencia de la genética en la adquisición del lenguaje surgen dos posturas opuestas: el constructivismo y el nativismo. El primer enfoque considera que la influencia de la genética es mínima. Los genes tan sólo especifican una capacidad de aprendizaje única del ser humano pero en ningún modo exclusiva del lenguaje. A diferencia del resto de animales, el ser humano es capaz de aprender, por ejemplo, a jugar al ajedrez, a resolver ecuaciones diferenciales o a hablar un lenguaje. Pero, según el constructivismo, no hay nada en nuestro genoma que diferencie esas tres actividades. A esta postura se opone el nativismo, que considera que es necesario que haya cierta predisposición genética para aprender el lenguaje. En palabras de Pinker, un *instinto del lenguaje*. El principal argumento que han esgrimido siempre los nativistas es el de *La Pobreza del Estímulo* [Chomsky, 1975]. Este argumento se basa en el llamado Teorema de Gold [Gold, 1967], que muestra que es imposible adquirir una gramática formal recursiva usando únicamente ejemplos de frases correctas (evidencias positivas). Los niños han de obtener las reglas de la gramática por generalización a partir de los ejemplos escuchados. Pero esas generalizaciones son, en algunos casos, correctas y, en otros casos, llevan a error como puede verse en estos ejemplos extraídos de Pinker [1994]

El hielo se derritió → Él derritió el hielo

David se murió → *Él murió a David**

Ella parece estar dormida → Ella parece dormida

Ella parece estar durmiendo → *Ella parece durmiendo**

Por tanto, es necesario algún tipo de mecanismo que limite las generalizaciones realizadas por el niño [Gold, 1967; Pinker, 1984]. Este mecanismo puede ser innato o bien puede consistir en correcciones sistemáticas por parte de los adultos. Sin embargo, numerosos estudios [Brown y Hanlon, 1970; Demetras et al., 1986; Bohannon y Stanowicz, 1988; Marcus, 1993] han demostrado que los niños apenas reciben correcciones por parte de los padres durante el proceso de adquisición de una lengua (en algunas casos se han llegado a cuantificar en tan sólo un 5 % de sus errores). Y, más aún, en la mayoría de los casos, esas correcciones no surten ningún efecto. Incluso en los casos en los que los adultos (o, como se vio al principio del capítulo, la mismísima Mafalda) se empeñan en corregir a un niño, éstos rechazan dichas correcciones. Este hecho puede verse ejemplificado en las siguientes líneas, que recogen una conversación entre el psicolingüista Martin Braine y su hija (tomada de Pinker [1994]).

Niña: Quiero otra una cuchara, papá.

Padre: Querrás decir que quieres LA OTRA CUCHARA.

Niña: Sí, quiero otra una cuchara, por favor, papá.

Padre: ¿No puedes decir “la otra cuchara”?

Niña: Otra... una... cuchara.

Padre: Di... “otra”.

Niña: Otra.

Padre: “Cuchara”.

Niña: Cuchara.

Padre: “Otra... cuchara”.

Niña: Otra... cuchara. Bueno ¿me das otra una cuchara?

(Posteriores intentos de corrección quedaron abortados por sus protestas, secundadas por las de mi mujer).

Por tanto, el argumento nativista puede resumirse en estos tres puntos:

- El Teorema de Gold muestra que existen determinados patrones en cualquier lenguaje natural que no pueden ser adquiridos usando únicamente evidencias positivas [Gold, 1967].
- En la inmensa mayoría de los casos, los niños sólo reciben evidencias positivas [Brown y Hanlon, 1970].
- Cualquier niño sano es capaz de adquirir la gramática correcta del lenguaje al que sea expuesto.

En conclusión, el ser humano ha de poseer ciertas capacidades lingüísticas que faciliten el proceso de adquisición de la gramática. Chomsky concretó estas capacidades en su teoría de la Gramática Universal [Chomsky, 1965] y sus distintas evoluciones como la Teoría de Principios y Parámetros [Chomsky y Lasnik, 1993] o el Programa Minimalista [Chomsky, 1993], todas ellas, teorías que van más allá de los objetivos de este texto.

Este argumento ha sido reformulado en muchas ocasiones y se han aportado nuevas evidencias a favor del mismo [Pullum y Scholz, 2002]. Sin embargo, los partidarios del constructivismo ven varios problemas en este argumento. En primer lugar el Teorema de Gold se refiere a gramáticas con recursividad infinita. Aunque teóricamente los lenguajes naturales poseen esa propiedad, los seres humanos no somos capaces de comprender algunas frases con tres o cuatro niveles de recursión. Por otra parte, también se ha cuestionado

la definición de evidencia negativa y su frecuencia. Según algunos autores [Pullum, 1996] los niños reciben evidencias negativas indirectas. Si un determinado patrón pudiera ser generado por una regla pero, sin embargo nunca fuera escuchado, el niño podría considerar que ese patrón no es gramaticalmente correcto. En el ejemplo anterior, el hecho de que nunca se escuche la frase *Él murió a David** puede considerarse como evidencia de que esa frase no es gramatical. Por último, la crítica más común se basa en que, con ciertos mecanismos de aprendizaje, la evidencia positiva es realmente suficiente para aprender la mayoría de patrones gramaticales. El problema principal es que el Teorema de Gold se basa en la necesidad de los niños de obtener reglas simbólicas a partir de los ejemplos escuchados. Pero, dado que el cerebro se caracteriza por un procesamiento en paralelo, distribuido y adaptativo, la suposición de que es necesario un tipo de procesamiento simbólico no parece demasiado intuitiva. En particular, la postura del conexionismo es la que más claramente se ha opuesto a la existencia de una gramática simbólica y codificada de algún modo genéticamente. El conexionismo propone un procesamiento distribuido en paralelo inspirado en el funcionamiento del cerebro humano. Así, el objetivo a largo plazo del enfoque conexionista consistió en demostrar que redes que no poseen ningún tipo de estructura ni conocimiento inicial pueden ser entrenadas para capturar las regularidades del lenguaje a partir, únicamente, de evidencias positivas. Por su parte, los enfoques simbólicos mantienen la necesidad de una representación simbólica de la información y de un conjunto de reglas para manejar dichas representaciones. De este modo, el debate entre nativismo y constructivismo evolucionó paulatinamente a un debate entre simbolismo y conexionismo basado en los sistemas de representación y procesamiento del cerebro humano.

Como se ha visto en la introducción, una de las ventajas del modelado computacional cognitivo es la necesidad de hacer explícitos todos los detalles de las teorías implementadas y su capacidad para avalar o refutar dichas teorías. Por tanto, cuando a mediados de la década de los 80 el modelado computacional cognitivo comenzó a desarrollarse [Rumelhart y McClelland, 1986], su irrupción en el debate entre simbolismo y conexionismo fue inevitable. Sin embargo, realizar modelos de adquisición del lenguaje a gran escala era (y aún a día de hoy es) inviable. Por tanto, fue necesario encontrar un dominio reducido donde probar los distintos modelos que tuviera las características adecuadas para que las conclusiones obtenidas pudiesen extrapolarse al procesamiento del lenguaje y la cognición en general. Este dominio reducido fue el de la morfología verbal. En él, el conexionismo y el simbolismo encontraron el ámbito ideal en el que concretar sus teorías y ponerlas en práctica a través del modelado computacional.

2.3. Adquisición de la morfología verbal. ¿una o dos rutas?

Como se ha comentado en la sección anterior, la adquisición de la morfología verbal y en particular, del pasado del inglés se convirtió en uno de los principales centros de atención en el debate sobre si el lenguaje y su adquisición se caracterizan por reglas formales o por patrones de activación que emergen de una red compleja. Pinker y Ullman [2002] lo señalan de la siguiente forma:

[...] *El pasado del inglés ha servido como uno de los principales fenómenos empíricos utilizados para contrastar las ventajas e inconvenientes del enfoque conexionista y simbólico del lenguaje y la cognición. Dado que las flexiones de pasado son simples, frecuentes y prevalentes en muchos idiomas, y dado que las variantes regulares e irregulares pueden ser igualadas en complejidad y significado, han servido como un caso de prueba para asuntos como la plausibilidad neurocognitiva de las reglas simbólicas y la interacción entre el almacenamiento y la computación en distintos procesos cognitivos.*

Por tanto, la simplicidad del problema (se trata de adquirir la flexión *-ed* y sus excepciones) y la posibilidad de extender las conclusiones obtenidas al ámbito del procesamiento lingüístico y cognitivo en general, han hecho de este fenómeno uno de los más estudiados.

Cuando a un niño se le pide que flexione el pasado de un verbo nuevo como *wug*, en la mayoría de los casos el niño responde *wugged* [Berko, 1958]. Más aún, el error más típico cometido por los niños al flexionar formas de pasado reales es la sobrerregularización, esto es, la aplicación del sufijo regular a una forma que realmente es irregular *break - breaked**. Por tanto, resulta obvio que los niños son capaces de extraer el patrón general “*para flexionar el pasado añade -ed*” y son capaces de generalizarlo. La pregunta consiste en cómo se obtiene y representa ese patrón (y cómo se aprenden las excepciones al mismo): en forma de patrones emergentes a través de la analogía en una red compleja o en forma de reglas que manipulan símbolos. Cada una de estas posturas es defendida por las teorías de una ruta y las teorías de dos rutas respectivamente.

Los modelos de una ruta [Rumelhart y McClelland, 1986] proponen que tanto las formas regulares como las irregulares son almacenadas y producidas por un único sistema de representación: una memoria asociativa comúnmente modelada por medio de una red neuronal. El principal mecanismo para la producción de formas verbales (tanto las ya escuchadas como la generalización a verbos nuevos) es la analogía fonológica. Este mecanismo se aplica tanto a las formas regulares como las irregulares. El hecho de que un niño

produzca un tipo de forma u otro depende de varios factores como el número de formas regulares e irregulares almacenadas en memoria, la similitud fonológica de cada una de ellas con el verbo que se quiere flexionar o la frecuencia de uso de cada una de esas formas. Por ejemplo, es posible que en un momento dado el verbo irregular *go* (ir) se conjugue como si fuera regular (*goed**) por su similitud fonológica con otras formas regulares como *mow* (cortar) o *row* (remar). Con el paso del tiempo, el patrón que asocia la forma de pasado correcta *went* con su infinitivo *go* se va reforzando y así el niño consigue reponerse de ese error. Por tanto, las teorías de una ruta explican la adquisición de la morfología verbal a través de un único sistema de memoria y un único mecanismo de flexión morfológica.

El enfoque alternativo es el de los modelos de doble ruta [Pinker y Prince, 1988; Marcus et al., 1992; Ullman, 2001]. De acuerdo con esta teoría, el conocimiento está de alguna forma dissociado. Las formas regulares son producidas mediante una regla que añade un sufijo al lexema verbal. Las formas irregulares son almacenadas en memoria como entradas del *léxico mental*. Sin embargo, estas formas no son almacenadas en una lista simple sino que están relacionadas entre sí a través de su similitud fonológica formando una red que permite recuperar de la memoria formas similares fonológicamente a la forma buscada [Prasada y Pinker, 1993]. La regla regular se aplica siempre que no se ha podido recuperar la forma verbal de la memoria bien porque no existe o bien porque no se es capaz de recordarla. Sin embargo, si una forma verbal es recuperada de la memoria, la regla regular es bloqueada. De este modo, al tratar de flexionar el pasado del verbo irregular *go* (ir), si la forma correcta (*went*) no se encuentra en memoria o no puede ser recordada, la regla regular da lugar a la forma incorrecta *goed**. Durante el proceso de desarrollo, la forma *went* se asienta y se refuerza en memoria facilitando su recuerdo y, por tanto, evitando la producción de la forma regularizada. Por tanto, las teorías de doble ruta proponen dos sistemas de memoria y dos mecanismos de producción de formas verbales bien diferenciados. Sin embargo, versiones más recientes del modelo de doble ruta consideran que algunas formas regulares (las de mayor frecuencia de uso) son almacenadas en el *léxico mental* [Pinker y Ullman, 2002; Ullman y Pierpont, 2005; Hartshorne y Ullman, 2006] y, por tanto, pueden ser producidas sin intervención de la regla regular. Aún así, se mantiene la idea de que las formas regulares no necesitan ser almacenadas en memoria para ser flexionadas correctamente.

Generalmente, los modelos de una y dos rutas se han asociado con las posiciones constructivista y nativista, respectivamente. Sin embargo, esta asociación no es muy adecuada [Ambridge y Lieven, 2011]. La única suposición nativista del modelo de dos rutas es que existe una distinción clara entre el *léxico mental* y la *gramática* y que esos dos sistemas

residen en área diferentes del cerebro [Ullman, 2001]. Por lo demás, sería posible que las reglas regulares sean adquiridas a partir de mecanismos cognitivos básicos sin necesidad de una base innata para esas reglas. Del mismo modo, las categorías gramaticales que algunos autores consideran innatas en el modelo de dos rutas [Ambridge y Lieven, 2011], podrían ser adquiridas como parte del proceso de desarrollo [Labelle, 2005]. Por su parte, la analogía que permite reforzar los patrones de las redes neuronales juega también un papel muy importante en el enfoque simbólico. Por tanto, la asociación directa de las teorías constructivista y nativista con los enfoques de una y dos rutas no parece ser muy adecuada. Los enfoques de una y dos rutas no son más que la adaptación del debate entre las teorías de procesamiento distribuido en paralelo y las teorías de procesamiento simbólico en serie aplicado al ámbito de la adquisición de la morfología verbal.

La evolución más reciente del debate puede verse en varias series de artículos y comentarios entre Pinker y Ullman y McClelland en el 2002 (ver [Pinker y Ullman, 2002] y artículos siguientes en el mismo número de la revista) y las respuestas por parte de otros autores durante el 2003 (ver [Seidenberg y Joanise, 2003] y siguientes) o el intercambio de opiniones generado a raíz del artículo de Ullman et al. en 2005 (ver [Ullman y Pierpont, 2005] y siguientes). A día de hoy, el debate sigue siendo intenso y ambas partes han ido relajando sus posturas. Como se ha señalado, el modelo dual admite la presencia de formas regulares almacenadas y la existencia de reglas de base fonológica, difuminando en cierto modo la distinción existente entre ambos modelos y dejándola, para muchos autores [McClelland y Patterson, 2002; Ambridge y Lieven, 2011], en un mero aspecto representacional. Sin embargo, la importancia de saber cuál es la forma de representación del lenguaje y de la cognición en general es innegable y por tanto, el debate sigue abierto. En este sentido, el modelo que en la actualidad ha sido definido con más detalle y en base a un mayor número de evidencias empíricas es el modelo declarativo/procedural [Ullman, 2001, 2004], que se comenta a continuación y que ha servido de base para este trabajo de tesis.

2.3.1. El modelo Declarativo/Procedural

El modelo Declarativo/Procedural (modelo DP) [Ullman, 2001, 2004] es, probablemente, el modelo teórico de doble ruta más extendido debido tanto a la concreción de su descripción como a la cantidad de evidencias favorables provenientes de distintas áreas como la Neuroimagen, la Psicología o la Lingüística. La premisa básica del modelo es que la distinción entre el léxico mental y la gramática está muy relacionada con la distinción entre la memoria declarativa y la memoria procedural. Esta distinción es clave a la hora de entender cómo funciona el procesamiento del lenguaje. Los sistemas de memoria de-

clarativa y procedural no son exclusivos del lenguaje sino que están implicados en otras muchas funciones tanto en humanos como en otras especies como primates o roedores [Eichenbaum y Cohen, 2001; Squire y Knowlton, 2000]. De ahí que sus sustratos funcionales, neuroanatómicos y psicológicos hayan sido estudiados en profundidad y, por tanto, puedan realizarse importantes predicciones acerca del funcionamiento del lenguaje en nuestro cerebro.

Según el modelo de doble ruta, el lenguaje depende de un léxico mental y una gramática [Chomsky, 1965; Pinker, 1994]. El léxico mental almacena la información semántica, morfológica y fonológica de las palabras que no puede ser derivada a partir de otras palabras y formas almacenadas. La gramática se encarga de generar formas complejas a partir de las formas almacenadas en el léxico. Estas dos estructuras interactúan de múltiples formas. La gramática accede al léxico para dar lugar a las formas complejas y estas formas pueden ser también almacenadas en el léxico si su uso es suficientemente frecuente. Además se observa el patrón general de que las formas almacenadas en el léxico suelen ser preferidas a aquellas que han de ser construidas por la gramática. Por tanto, estos dos sistemas están íntimamente ligados para dar lugar al núcleo del lenguaje. Y, como se verá a continuación, comparten gran cantidad de características con los sistemas de memoria declarativa y procedural comentados.

2.3.1.1. Memoria declarativa

El sistema de memoria declarativa se encarga del aprendizaje, representación y uso del conocimiento semántico (hecho conocidos como “Madrid es la capital de España”) y episódico (experiencias personales). Esta información es accesible a otros sistemas y puede ser recordada conscientemente (al menos parcialmente) [Squire y Zola, 1996]. De acuerdo con el modelo declarativo/procedural, los sistemas cerebrales que subyacen a la memoria declarativa, subyacen también al léxico mental. Es decir, estos sistemas no almacenan sólo el conocimiento sobre hechos y experiencias sino también el conocimiento específico de las palabras como sus significados, sonidos y características gramaticales abstractas.

Las estructuras cerebrales implicadas en el sistema de memoria declarativa abarcan áreas del lóbulo medio-temporal (encargadas del aprendizaje, codificación y acceso a nuevas formas), regiones inferiores y ventro-temporales (encargadas de almacenar el significado y representaciones léxicas abstractas [Damasio et al., 1996]) y áreas del córtex superior temporal (encargadas de almacenar las representaciones fonológicas). Además, la interacción entre la memoria declarativa y procedural es muy estrecha. Por tanto, existen áreas cerebrales que participan en ambos sistemas. Algunas de ellas se comentan a continuación.

2.3.1.2. Memoria procedural

El sistema de memoria procedural se encarga del aprendizaje de nuevas reglas y la aplicación de las ya existentes. En particular, procesa las reglas encargadas de dar lugar a las regularidades del lenguaje a partir de elementos simples [Chomsky, 1965]. La memoria procedural interviene en todos los niveles del lenguaje: sintáctico, morfológico (tanto para formas regulares, como para algunas irregulares), fonológico y semántico [Ullman, 2004].

La memoria procedural está basada fundamentalmente en dos estructuras cerebrales: el ganglio basal y el córtex frontal (en particular el Área de Broca). Las dos están conectadas a través de canales neuronales que atraviesan el tálamo. La gramática es procesada por uno o varios de esos canales que, a su vez, participan en otras tareas no lingüísticas como el aprendizaje secuencial. Tanto el ganglio basal como el área de Broca, se encargan del mantenimiento de los elementos de las representaciones lingüísticas complejas en la memoria de trabajo y del aprendizaje de reglas a partir de esas representaciones [Ullman, 2006]. Otras estructuras subyacentes a la memoria procedural, como el córtex parietal o el cerebelo, podrían tener un cierto papel en el procesamiento del lenguaje pero tanto su influencia como su rol concreto no está realmente claro [Ullman, 2004].

Interacción entre los dos sistemas Como se ha mencionado, los sistemas declarativo y procedural están íntimamente ligados e interaccionan de forma cooperativa y competitiva. Las interacciones más importantes desde el punto de vista del procesamiento del lenguaje se detallan a continuación:

- El sistema procedural adquiere las reglas gramaticales a partir de los ejemplos almacenados en la memoria declarativa. Las formas léxicas almacenadas sirven de patrón a partir del cual el sistema procedural abstrae gradualmente las reglas de la gramática.
- Ambos sistemas pueden adquirir el mismo tipo de conocimiento, o similar. Por ejemplo, algunas formas regulares pueden ser almacenadas en la memoria declarativa por su elevada frecuencia de uso a la vez que el patrón regular también es adquirido como una regla en la memoria procedural.
- Por último, ambos sistemas interaccionan de forma competitiva: la flexión de una forma verbal a través de las reglas almacenadas en la memoria procedural es bloqueada por el acceso a una determinada representación en la memoria declarativa.

2.3.1.3. Evidencias

A día de hoy existe gran cantidad de evidencias en favor del modelo declarativo-procedural [Pinker, 1999; Ullman, 2001; Pinker y Ullman, 2002; Kaan y Swaab, 2002; Friederici, 2002]. A continuación se presentan aquellas relacionadas con los trastornos tradicionalmente considerados “del lenguaje” y con trastornos que, a pesar de no ser haber sido relacionados directamente con el lenguaje, lo afectan en mayor o menor medida.

Trastornos del lenguaje

Trastorno específico del lenguaje Tradicionalmente, el TEL ha sido considerado un trastorno específico de la gramática [Rice et al., 1995] o un déficit de procesamiento en la memoria de trabajo [Gathercole y Baddeley, 1993]. Sin embargo, son muchas las evidencias que apuntan a que el TEL podría estar asociado con un trastorno en la memoria procedural [Ullman y Pierpont, 2005]. A continuación se recogen algunas:

- Trastornos motores: Gran cantidad de pacientes de TEL presentan trastornos motores que son difícilmente explicados por las teorías clásicas. En particular, muestran problemas en tareas que implican secuencias complejas de movimientos que son controladas por la memoria procedural [Bishop, 2002]. Además, los pacientes presentan problemas en tareas de rotación mental y otras tareas que involucran la manipulación mental de imágenes [Leonard, 1998]. Todas ellas relacionadas con la memoria procedural.
- Memoria declarativa intacta: Las tareas relacionadas con la memoria declarativa permanecen a menudo intactas en los pacientes con TEL [Dewey y Wall, 1997; Ullman y Pierpont, 2005].
- Morfología cerebral: El TEL está relacionado con anormalidades en las estructuras cerebrales que subyacen a la memoria procedural: el área de Broca, el ganglio basal (en particular el núcleo caudado) y el cerebelo [Gauger et al., 1997].

Afasia La afasia es otro de los trastornos del lenguaje que aporta evidencias claras a favor del modelo declarativo/procedural. La afasia puede dividirse en dos grandes tipos: afasia no fluida (o afasia de Broca) y afasia fluida (o afasia de Wernicke). La afasia de Broca está causada por un daño en estructuras cerebrales subyacentes a la memoria procedural, principalmente en el ganglio basal y en el área de Broca [Dronkers et al., 1998]. Los pacientes con este tipo de afasia presentan un marcado *agramatismo*. Las estructuras sintácticas y morfológicas no son correctas. En particular, presentan mayores problemas

con la morfología de las formas regulares que con la de las formas irregulares [Pinker y Ullman, 2002]. Además, este tipo de afasia está muy relacionada con funciones no lingüísticas que dependen del sistema procedural como trastornos motores generales o aprendizaje de secuencias motoras [Dronkers et al., 1998].

Por su parte, la afasia de Wernicke está causada por daños en regiones asociadas con el sistema declarativo. Los pacientes afectados presentan problemas en el conocimiento conceptual [Dronkers et al., 1998] mientras que las oraciones que producen suelen tener una estructura sintáctica correcta (aunque el contenido es difícilmente inteligible). Además, en cuanto a la morfología verbal presentan el patrón inverso al observado en la afasia de Broca puesto que tienen mayores dificultades con las formas irregulares.

Trastornos no específicos del lenguaje

Trastornos del desarrollo Varios trastornos del desarrollo están relacionados con problemas en la memoria procedural. En particular, la dislexia, el déficit de atención-hiperactividad y los trastornos del espectro autista presentan estos problemas. Según las predicciones del modelo declarativo-procedural, en estos desórdenes se deberían observar dificultades gramaticales y, efectivamente, este es el caso. Por ejemplo, en el autismo se han detectado problemas a nivel sintáctico [Van Meter et al., 1997] y a nivel morfológico [Howlin, 1984]. Mientras que no se detectan problemas en el conocimiento léxico, dependiente del sistema declarativo [Tager-Flusberg, 1985].

Alzheimer El Alzheimer afecta a estructuras del neocórtex del lóbulo temporal dejando prácticamente intactas el área de Broca y el ganglio basal. Por tanto, el modelo DP predice problemas relacionados con la memoria declarativa. En efecto, los pacientes de Alzheimer tiene problemas para adquirir conocimiento léxico y conceptual mientras que adquieren distintas tareas motoras sin apenas problemas. En cuanto a la morfología verbal, los pacientes de Alzheimer muestran problemas al flexionar las formas irregulares tanto en inglés [Ullman et al., 1997] como en italiano [Walenski et al., 2009]. También en línea con las predicciones del modelo DP, muchos otros trastornos *no específicos del lenguaje* como la demencia semántica, el parkinson o la amnesia muestran también evidencias en favor del modelo DP. Su comentario queda fuera del ámbito de este trabajo. Puede verse un resumen de ellas en [Ullman, 2004].

2.4. Modelado computacional de la adquisición de la morfología verbal

Las dos teorías explicadas en la sección anterior han sido implementadas mediante distintos modelos computacionales que pueden englobarse en dos grandes vertientes: la conexionista y la simbólica. Estos modelos han ayudado a refinar y mejorar dichas teorías. Sin embargo, a día de hoy, sigue sin estar claro si nuestro cerebro representa un conjunto de reglas simbólicas como tal o si por el contrario funciona como un simple asociador de patrones. Una recopilación exhaustiva de los trabajos realizados podría llenar un libro entero. Por tanto, el objetivo de esta sección es hacer un repaso cronológico de los principales modelos que se han presentado y de cómo reproducen los principales fenómenos empíricos observados en los niños. En particular, se hace especial hincapié en uno de los fenómenos más estudiados: el aprendizaje en forma de U. Este fenómeno se refiere a la curva de desarrollo detectada en la adquisición de las formas irregulares. En ella se pueden distinguir tres etapas bien diferenciadas [Marcus et al., 1992]. En la primera etapa, el niño es capaz de flexionar muy pocos verbos irregulares, pero sus porcentajes de acierto son muy elevados. En la segunda etapa, se observan gran cantidad de errores de sobrerregularización (o aplicación del sufijo regular), con lo que las tasas de acierto descienden considerablemente. Por último, en la tercera etapa, estos errores descienden hasta desaparecer, con lo que la tasa de aciertos vuelve a alcanzar el 100 %.

2.4.1. Modelos conexionistas

Los modelos conexionistas se basan en la hipótesis de que los mecanismos cerebrales son una propiedad emergente de los distintos estados de un sistema neural distribuido. Esta hipótesis comenzó a ponerse en práctica en modelos computacionales a partir de la década de los 80, cuando el grupo de Procesamiento Distribuido en Paralelo (PDP) presentó varios modelos como el de la adquisición del pasado del inglés [Rumelhart y McClelland, 1986]. Las principales características de estos modelos son:

- **Arquitectura:** Los modelos conexionistas tienen una arquitectura reticular con dos elementos principales: nodos y conexiones. Los nodos están inspirados en las neuronas biológicas. Producen una señal de salida que es producto de las señales de entrada que reciben. Las conexiones representan las dendritas y axones neuronales. Transmiten las señales producidas por un nodo a todos los nodos con los que éste está conectado. Típicamente, los nodos se agrupan en capas diferenciadas que reciben las señales de entrada de la capa anterior y mandan sus señales de salida hacia la capa posterior (aunque, en algunos casos pueden tener también conexiones entre ellas). Un ejemplo

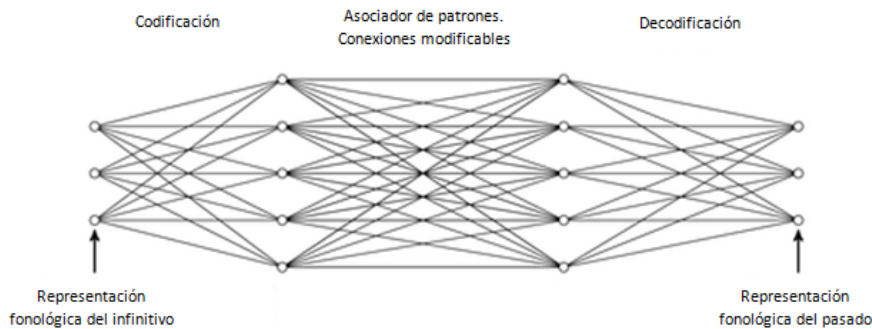


Figura 2.1: Arquitectura del modelo de Rumelhart y McClelland [1986]

de arquitectura conexionista es el utilizado por Rumelhart y McClelland [1986] y que se muestra en la figura 2.1

- Conocimiento: En los modelos conexionistas el conocimiento se haya distribuido. La representación del mismo consiste en el patrón de activación que se da entre las unidades de la red y su procesamiento consiste en la evolución en el tiempo de dichos patrones.
- Aprendizaje: La retropropagación es el algoritmo básico de aprendizaje en los modelos conexionistas. Este mecanismo consiste en ajustar los pesos de las conexiones de la red a partir de las diferencias entre la señal producida y la señal correcta. Una vez producida una señal de salida, ésta se compara con la señal correcta y se van ajustando los pesos desde la capa de salida hacia las capas anteriores en función del error calculado

2.4.1.1. Modelos conexionistas de la adquisición de la morfología verbal inglesa

En las últimas dos décadas se ha llevado a cabo un gran esfuerzo para tratar de corroborar tanto la teoría de una ruta como la de dos rutas. En particular, el modelado computacional ha sido una herramienta ampliamente usada desde que Rumelhart y McClelland [1986] propusieron la primera red conexionista para la adquisición de la morfología del pasado en inglés. Su modelo consistía en una red de dos niveles que ajustaba sus pesos dependiendo de la correlación de los patrones de entrada y de salida. De este modo, la red era capaz de adquirir la morfología del pasado inglés reforzando los patrones fonológicos correctos. El modelo de Rumelhart y McClelland [1986] provocó gran cantidad de críticas [Pinker y Prince, 1988]. En primer lugar, el modelo fue incapaz de reflejar una de las características más marcadas del aprendizaje de las formas irregulares: la curva de aprendizaje

en forma de U. El resto de críticas se centraron en diversos aspectos del modelo como las manipulaciones injustificadas de las tasas de entrada, la producción de algunos errores que nunca eran producidos por los niños, la baja plausibilidad de las representaciones fonéticas utilizadas o la incapacidad de diferenciar entre verbos homófonos puesto que sólo usaba información fonológica. Los modelos posteriores trataron de ir superando estas críticas.

Plunkett y Marchman [1990, 1991, 1993]. A principios de los noventa Plunkett y Marchman [1990, 1991, 1993] propusieron distintas mejoras de un mismo modelo que conseguía reflejar una mayor cantidad de datos empíricos. Para ello, utilizaron una implementación más adecuada de aprendizaje incremental y de las representaciones fonéticas. Su modelo consistía en una red neuronal de tres capas entrenada con un lenguaje artificial y una representación distribuida de los fonemas de entrada. En estos trabajos se comenzó a mostrar la transición entre una etapa de comportamiento básicamente memorístico y una etapa de comportamiento similar al producido por el uso de reglas regulares. Sin embargo, algunos de los problemas del modelo de Rumelhart y McClelland [1986] se mantuvieron. La curva de desarrollo en forma de U se conseguía con manipulaciones de las tasas de entrada poco justificables y, de hecho, la curva en forma de U se observaba tanto en las formas regulares como en las irregulares, hecho que no se corresponde con lo observado empíricamente [Marcus et al., 1992].

MacWhinney y Leinbach [1991]. En las mismas fechas que los trabajos anteriores, la propuesta de MacWhinney y Leinbach [1991] fue la primera en combinar en la entrada al modelo información fonológica y semántica. Al igual que en los casos anteriores, se utilizó una red neuronal de tres capas entrenada en un lenguaje artificial. En una de las simulaciones, se utilizó una representación distribuida tanto para la información fonológica como para la información semántica de cada forma. Esta simulación mostró la importancia de la semántica en la adquisición de formas irregulares. De este modo, el modelo era capaz de distinguir entre formas fonéticamente similares (como *ring-ringed* (rodear), *ring-rang* (llamar)) resolviendo así el problema de la homofonía del que adolece cualquier modelo que use sólo información fonológica. Sin embargo, al igual que su predecesor, este modelo seguía teniendo problemas para producir la curva en forma de U.

Plunkett y Juola [1999]. Posteriormente, y basándose en los modelos ya comentados de principios de los 90, Plunkett y Juola [1999] proponen un nuevo modelo que, además de ser capaz de diferenciar entre verbos homófonos, es capaz de adquirir la morfología de distintas clases gramaticales, ampliando así el ámbito de adquisición más allá de los verbos. Su modelo, también basado en una arquitectura de tres capas, fue capaz de adquirir

el pasado verbal y el plural de los sustantivos. Para ello, hubo de incluir en la capa de entrada información sobre la categoría gramatical de la forma a flexionar. De este modo, la entrada de su red combinaba información fonológica, semántica y gramatical. La generalidad del modelo no sólo se vio ampliada al ser capaz de adquirir distintas clases gramaticales sino que el número de fenómenos empíricos modelados también se incrementó. Por ejemplo, tanto el orden de adquisición de las distintas flexiones como las tasas de sobrerregularización en las distintas categorías gramaticales estaban en línea con los estudios empíricos realizados hasta la fecha. A pesar de estos avances significativos, el modelo sólo fue capaz de producir la curva en forma de U a través de una manipulación de las tasas de entrada al modelo un tanto artificial: el vocabulario inicial consistía en 20 formas verbales con las que se entrenaba la red hasta que conseguía un 100 % de efectividad. A continuación, el tamaño del vocabulario se iba incrementando exponencialmente hasta entrenar la red con el vocabulario completo.

Karaminis y Thomas [2010]. Basándose en el modelo de Plunkett y Juola [1999] y yendo un paso más allá, Karaminis y Thomas [2010] proponen un modelo capaz de adquirir la morfología flexiva de varias clases gramaticales (sustantivos, verbos y adjetivos) cubriendo un amplio rango de fenómenos empíricos y dando lugar, por tanto, a un modelo más general por su alcance tanto en términos de categorías gramaticales como en términos de fenómenos estudiados. Sin embargo, este modelo sigue presentando ciertas limitaciones como su incapacidad para capturar el aprendizaje en forma de U para las formas irregulares o su baja proporción de omisiones.

2.4.1.2. Modelos conexionistas de la adquisición de la morfología verbal en otros idiomas

Como ya se ha mencionado, la mayor parte del trabajo conexionista y simbólico se ha centrado en la adquisición de la morfología verbal inglesa. En concreto en la adquisición de las formas verbales de pasado. Sin embargo, desde un punto de vista teórico, es de gran importancia el modelado de la adquisición de la morfología verbal en distintos idiomas. En este sentido, la atención se ha centrado en aquellos idiomas en los que las formas regulares no son las más frecuentes (*minority-default systems* en inglés). Algunos ejemplos son el plural del alemán [Marcus et al., 1995; Nakisa y Hahn, 1996], el participio pasado del alemán [Marcus et al., 1995; Ruh y Westermann, 2008] o el árabe [Plunkett y Nakisa, 1997]. El interés de estos sistemas flexivos reside en que los defensores de las teorías de doble ruta argumentan que estos sistemas evidencian la necesidad de un componente basado en reglas que sea capaz de generar esas formas. Los modelos conexionistas que se presentan a continuación han tratado de demostrar que la presencia de dicho componente

no es necesaria para adquirir esos sistemas flexivos. Otros sistemas que han despertado interés por su mayor complejidad son los sistemas altamente flexionados, como el griego o el castellano. La posibilidad de modelar el proceso de adquisición de un sistema flexivo pobre y un sistema rico usando un mismo modelo, es decir, suponiendo las mismas capacidades cognitivas, sería de gran interés. Sin embargo, a día de hoy, el único modelo conexionista capaz de adquirir varios sistemas flexivos es el propuesto por Karaminis y Thomas [2010] para los sistemas del Inglés y el Griego.

Hahn y Nakisa [2000]. A principios de siglo, Hahn y Nakisa [2000] compararon diferentes modelos de una y dos rutas en el contexto de la morfología alemana. Estos autores argumentan que los modelos de una ruta se comportan mucho mejor que los de dos rutas al ser usados en una tarea de generalización a palabras nuevas. Sin embargo, de nuevo los regímenes de entrenamiento y las tasas de entrada al modelo carecen de plausibilidad. Las etapas de entrenamiento y de test de la red se realizaron con dos partes del vocabulario distintas y, aún así, su modelo fue incapaz de adquirir la regla regular en la misma medida que los hablantes de alemán.

Ruh y Westermann [2008, 2009]. Mas adelante, Ruh y Westermann [2008, 2009] propusieron un modelo conexionista también para la adquisición de las flexiones verbales en alemán basado en una Red Neuronal Constructivista de tres capas. En este tipo de redes, el número de nodos de la capa oculta se incrementa en función de las necesidades del modelo. Además, el modelo presentaba la particularidad de que tenía dos rutas muy bien diferenciadas, hecho que ha llevado a que algunos autores hayan asociado de algún modo este modelo con el modelo dual. Estos dos últimos trabajos abrieron el camino hacia un modelo general de la adquisición de la morfología en distintos idiomas. Aunque todos abordaban sistemas flexivos mucho más simples que el del castellano.

Eddington [2009]. No es hasta el año 2009 cuando se encuentra el primer trabajo que trata de modelar un sistema flexivo tan complejo como el del castellano [Eddington, 2009]. Su autor propuso un modelo de una ruta que trataba de replicar varios estudios empíricos sobre la adquisición y el procesado de la morfología verbal en castellano. En particular, trata de demostrar que un modelo de una ruta puede producir la disociación entre verbos regulares e irregulares observada en el estudio de Clahsen et al. [2002] (estudio que posteriormente se usará en este mismo trabajo). En ese estudio se muestra una clara tendencia en los niños a producir errores de sobrerregularización frente a la casi inexistencia de errores de irregularización. Eddington [2009] argumenta que su modelo es capaz de mostrar mas errores de sobrerregularización que de irregularización. Sin embargo, haciendo

un análisis más profundo se observa que los resultados pueden ser cuestionados. Un análisis cuantitativo de los resultados muestra que las distintas tasas de error mostradas por su modelo son, en algunos casos, extremadamente diferentes de las presentadas por los niños. Por ejemplo, el autor comenta para el imperfecto de algunos verbos que *“En las tres simulaciones, ninguno de los verbos irregulares es producido correctamente”* mientras que los niños muestran tasas de acierto superiores al 90 % en esos mismos verbos [Clahsen et al., 2002]. Un comentario similar se puede hacer sobre el porcentaje de formas irregulares flexionadas como otra forma irregular distinta. En el estudio de Clahsen et al. [2002] estos errores son sólo el 1.6 % del total mientras que este modelo presenta un 66.7 % de errores de ese tipo en el imperfecto o un 24.1 % en el presente. Además, un análisis cualitativo de los resultados muestra que algunos de los errores cometidos por el modelo nunca serían cometidos por un niño. Por ejemplo, el modelo produce la forma verbal “iba” para el imperfecto del verbo “ser”. Un error de ese tipo, en el que se produce una forma verbal perteneciente a otro verbo no se encuentra en ninguno de los estudios empíricos. Por tanto, a pesar de ser un primer enfoque aceptable, el modelo debería ser matizado y mejorado si se quieren extraer conclusiones útiles sobre el proceso de adquisición de la morfología verbal en castellano.

Karaminis y Thomas [2010]. Siguiendo el trabajo comentado en la sección anterior, Karaminis y Thomas [2010] ampliaron su modelo para explicar el proceso de adquisición del Griego, un idioma con un sistema flexivo mucho más rico que el inglés y que carece de formas por defecto (forma básica usada ante la incapacidad de producir la forma flexionada correcta). De nuevo, el modelo fue capaz de captar gran cantidad de fenómenos empíricos, pero adolecía de los mismos problemas que la versión inglesa: tasas de omisión muy bajas y dificultades para obtener el aprendizaje en forma de U.

2.4.1.3. Modelos conexionistas: discusión

Puntos fuertes. La principal fortaleza del enfoque conexionista reside en la flexibilidad de su sistema de aprendizaje. La distinción entre regulares e irregulares no surge a partir de reglas propias de cada lenguaje sino que emerge como el producto del aprendizaje a partir de los patrones de frecuencia de uso y similitud fonológica [Bates, 1991]. De este modo, los modelos conexionistas son fácilmente extensibles a otros idiomas. Además, como se ha visto, existe una gran cantidad de modelos computacionales completamente especificados y detallados. Como se comentó en la introducción, una de las ventajas del modelado computacional es que obliga a hacer explícitos todo tipo de detalles que de otra forma podrían pasar sin ser especificados dando lugar a incoherencias en la teoría. En este sentido, el trabajo de modelado en el enfoque simbólico ha sido mucho menor.

Puntos débiles. Son varios los puntos débiles del enfoque conexionista. Para empezar, la mayoría de los modelos tiene problemas para producir la curva de desarrollo en forma de U típica de la adquisición de las formas irregulares. Además, los valores de generalización en verbos nuevos no suelen adecuarse a los valores observados empíricamente y, en general, ninguno de los modelos es capaz de ajustarse a un gran abanico de fenómenos. Otro de los principales inconvenientes de este enfoque es que su comportamiento depende enormemente de la estructura de los datos de entrada. Como se ha comentado, muchos de los modelos utilizan manipulaciones de los vocabularios de entrada difícilmente justificables [Marcus et al., 1995] como frecuencias de verbos regulares que no se asemejan a los datos empíricos o incrementos exponenciales del vocabulario. Por último, es importante mencionar la baja plausibilidad psicológica que tiene en este ámbito uno de los pilares del enfoque conexionista: la retropropagación. Los modelos conexionistas usan el mecanismo de retropropagación para ajustar los pesos de sus conexiones. Este mecanismo se basa en el cálculo del error entre la forma producida por el modelo y la forma correcta. Pero, como se ha comentado, los niños no reciben apenas correcciones por parte de los adultos, de modo que cuando producen una forma verbal, no tienen la forma correcta para comparar. El argumento del conexionismo en respuesta a este hecho consiste en que el niño cada vez que escucha una forma verbal predice lo que él habría dicho y compara la forma predicha con la escuchada [Plunkett y Juola, 1999]. Si la forma predicha (por ejemplo, *breaked**) no coincide con la forma escuchada (*broke*), el niño deduce que su predicción no es correcta y ajusta los pesos de la red en consecuencia. Esta hipótesis implica que el niño aprende únicamente al escuchar formas verbales y no al producirlas. Sin embargo, todas las evidencias observadas indican que la práctica es un elemento clave en la adquisición general de conocimiento [Taatgen, 2001].

2.4.2. Modelos simbólicos

Los modelos simbólicos se inspiran en la lógica matemática para representar el funcionamiento del cerebro. Es decir, están basados en la manipulación de símbolos por medio de reglas. En el ámbito del modelado computacional, las principales características de estos modelos son:

- **Arquitectura:** En general, la arquitectura de estos modelos suele ser una arquitectura modular. Esta arquitectura consta de dos módulos fundamentales: un módulo de almacenaje de símbolos (léxico) y un módulo de procesamiento con las reglas (sintaxis). A partir de ahí, diversas arquitecturas han ido añadiendo distintos módulos hasta llegar a sistemas complejos de representación de los procesos cognitivos como ACT-R [Anderson, 1983]

- Conocimiento: En los modelos simbólicos, el conocimiento se representa por un conjunto de símbolos y el procesamiento del mismo se lleva a cabo por un conjunto de reglas que manipulan esos símbolos.
- Aprendizaje: El aprendizaje en los modelos simbólicos se da mediante la creación, modificación y refuerzo tanto de los símbolos como de las reglas.

2.4.2.1. Modelos simbólicos de la adquisición de la morfología verbal inglesa

Ling y Marinov [1993]. A raíz de los primeros modelos conexionistas [Rumelhart y McClelland, 1986; MacWhinney y Leinbach, 1991], Ling y Marinov [1993] propusieron su *asociador de patrones simbólico* basado en el algoritmo C4.5 [Quinlan, 1993] para inducir reglas. En sus simulaciones utilizaron los mismos verbos usados por MacWhinney y Leinbach [1991] y obtuvieron mejores resultados tanto en formas verbales reales como en generalización a nuevas formas. Además, los procesos de entrenamiento y test eran mucho más plausibles [Ling, 1994]. Sin embargo, la curva en forma de U se obtenía mediante la manipulación explícita del número de veces que una determinada forma debía ser presentada al modelo para que éste la memorizara como una excepción.

Taatgen y Anderson [2002]. Uno de los modelos duales más influyentes es el propuesto por Taatgen y Anderson [2002]. En ese trabajo se presenta un modelo de ACT-R basado en dos estrategias básicas de dominio general: recuerdo y analogía. El modelo era capaz de mostrar la curva en forma de U sin necesidad de correcciones externas, cambios en el vocabulario o tasas de verbos regulares irreales. Sin embargo, el modelo es incapaz de producir errores de irregularización o errores de doble marca del pasado como **broked*. Además, el modelo no es capaz de adquirir lenguajes altamente flexionados como el castellano.

2.4.2.2. Modelos simbólicos de la adquisición de la morfología verbal en otros idiomas

Al igual que en el caso de los modelos conexionistas, no existen muchos trabajos que traten de modelar idiomas distintos al inglés. Más aún, hasta la fecha, ninguno de esos esfuerzos ha tratado de presentar un modelo capaz de adquirir dos sistemas flexivos muy diferentes.

Taatgen [2001]; Taatgen y Dijkstra [2003]. A principios de siglo surgieron los primeros modelos simbólicos de la adquisición de la morfología verbal en otros idiomas. Taatgen [2001]; Taatgen y Dijkstra [2003] presentaron varias versiones de su modelo original adaptados al caso del plural alemán. Como ya se ha mencionado, éste es un problema más

complicado puesto que existe más de una regla regular y la frecuencia de las formas regulares es mucho menor que la que se da en inglés. Su modelo fue capaz de adquirir la regla regular a pesar de su baja frecuencia y consiguió replicar muchos de los fenómenos empíricos observados. Incluso, en su trabajo de 2003 introdujeron por primera vez información fonológica. Sin embargo, las representaciones fonológicas utilizadas carecen de plausibilidad y la inducción de la regla regular estaba fuertemente condicionada por la estructura de dichas representaciones. Además, como en el caso de su modelo de adquisición de la morfología inglesa, estos modelos están lejos de ser generalizables a sistemas verbales altamente flexionados.

Oliva et al. [2010] Uno de los primeros esfuerzos para modelar la adquisición de la morfología verbal en un lenguaje altamente flexionado como el castellano es el realizado por Oliva et al. [2010]. En este trabajo se presenta un modelo de ACT-R que adapta las estrategias básicas propuestas por Taatgen y Anderson [2002] al problema de la adquisición del sistema flexivo del castellano. Una de las mayores limitaciones de estos modelos comentados es que ninguno de ellos utiliza información fonológica.

2.4.2.3. Modelos simbólicos: discusión

Puntos fuertes La principal ventaja del enfoque simbólico es que ofrece el beneficio de explicar un rango mayor de fenómenos empíricos, incluidos el aprendizaje en forma de U o las tasas de generalización de nuevos verbos. Otro de sus puntos fuertes es su capacidad para extender las conclusiones de la adquisición de la morfología verbal a mayor escala, pudiendo llegar a explicar el funcionamiento general de la gramática (a pesar de que un modelo computacional a esa escala es, a día de hoy, inviable).

Puntos débiles Una de las principales desventajas de los modelos simbólicos es la dificultad para representar y utilizar la información fonológica convenientemente. Existen muchas evidencias de que los verbos se agrupan en conjuntos atendiendo a su similitud fonológica y que esa similitud es usada por los humanos a la hora de producir nuevas formas [Marcus et al., 1995]. Por ejemplo, Xu y Pinker [1995] en su estudio de la adquisición de la morfología verbal inglesa, recogieron algunos errores como *bring-*brang* que parecen deberse a la similitud fonológica con un grupo de verbos de alta frecuencia como *sing-sang*, *ring-rang*. Del mismo modo, en su estudio de la adquisición del castellano, Clahsen et al. [2002] recogieron errores como **punieron* en lugar de *pusieron*, probablemente por analogía con *pudieron* (nótese que los infinitivos de estos verbos son *poner* y *poder*, muy similares en términos fonológicos). Sin embargo, estos errores suponen tan sólo un 0.19 % de los errores en inglés [Xu y Pinker, 1995] o un 1.1 % en castellano [Clahsen et al., 2002].

Además, algunos autores señalan el escaso esfuerzo de modelado que se ha realizado hasta la fecha siguiendo el enfoque simbólico [Thomas y Karmiloff-Smith, 2005]. Como se ha podido comprobar, a día de hoy, se han implementado muchos más modelos en el ámbito del conexionismo. Esto implica que el modelo de doble ruta podría estar de alguna forma falto de detalles, perdiendo parte de su valor predictivo y de su plausibilidad.

Marco teórico para el modelado de la adquisición de la morfología verbal

Los ordenadores son cada vez más y más inteligentes. Los científicos aseguran que en breve ellos serán capaces de hablarnos. (Y por “ellos” me refiero a los ordenadores. Dudo mucho que los científicos nos hablen alguna vez).

Dave Barry, escritor y humorista estadounidense.

En este capítulo se comentan los objetivos y la metodología utilizados en el experimento de modelado que constituye el núcleo de la primera parte de este trabajo. La sección 3.1 explica la tarea a modelar: el proceso de adquisición de la morfología verbal inglesa y castellana. Para ello se explican en primer lugar las particularidades de cada uno de los sistemas morfológicos para, a continuación, comentar los patrones de desarrollo observados en niños ingleses y españoles. En la sección 3.2 se explica la metodología seguida en la tarea de modelado y se da una introducción a ACT-R, la arquitectura cognitiva sobre la que se ha desarrollado el modelo. Se detallan la representación de la información utilizada por el modelo, el vocabulario utilizado y el procedimiento seguido en cada uno de los experimentos.

3.1. Objetivo

El objetivo del modelo presentado es tratar de describir los procesos y estructuras involucrados en la adquisición de la morfología verbal tanto en castellano como en inglés. Como se ha comentado en el capítulo 1, la mayoría de los estudios experimentales y modelos computacionales en el ámbito de la adquisición de la morfología verbal se han centrado

en el inglés. Sin embargo, el modelado de cualquier fenómeno lingüístico en distintos idiomas parece clave para poder extraer conclusiones de carácter general. Es necesario tener en cuenta un amplio abanico de idiomas para tratar de capturar esos aspectos generales de la adquisición del lenguaje sin quedarse atrapados en aquellos aspectos que son solo característicos del sistema flexivo del lenguaje estudiado. Por tanto, el enfoque translingüístico que se adopta en este trabajo de tesis ofrece un mejor punto de vista de las representaciones y procesos que subyacen a la adquisición de la morfología verbal, y contribuye, en cierta medida, a la generalidad del modelo.

En particular, la morfología verbal inglesa constituye un sistema extremadamente simple. Y, por tanto, como comenta Clahsen [1999],

El pasado del inglés no es el sistema flexivo más apropiado para examinar la distinción entre memoria y representaciones basadas en reglas.

La morfología juega un papel mucho más importante en otros idiomas. Por ejemplo, en inglés tan sólo existe un sufijo para el pasado y no se reflejan en sus flexiones algunas características gramaticales como el modo o el aspecto. Además, el inglés presenta una serie de características que facilitan el aprendizaje y que no son generalizables a otros idiomas. Por ejemplo, el número de sufijos y características gramaticales o la particular distribución de formas regulares e irregulares. Sin embargo, el castellano posee un sistema flexivo muy rico. En él existen más de cuarenta posibles sufijos [Alcoba, 1999] que reflejan gran cantidad de características gramaticales como el modo, el tiempo, el aspecto o la conjugación. Además, otras características de este sistema como la heterogénea distribución de las irregularidades, dificultan en gran medida su aprendizaje. De este modo, parece adecuado tratar de modelar los procesos de adquisición en dos sistemas tan distintos como el del inglés y el del castellano para obtener conclusiones de carácter general.

Las siguientes subsecciones muestran las características de ambos sistemas flexivos y los errores que suelen cometer los niños al tratar de adquirirlos.

3.1.1. Morfología verbal del inglés

El pasado de los verbos regulares ingleses se forma añadiendo el sufijo *-ed* al lexema verbal. En términos fonéticos, ese sufijo tiene tres alomorfos: /t/ (*fished*), /d/ (*buzzed*) y /ɪd/ (*wanted*). Los verbos irregulares son aquellos que no siguen esta regla. Sin embargo, el sistema irregular inglés se denomina “quasi-regular” puesto que, salvo algunas excepciones (*go/went*) los verbos irregulares suelen agruparse en torno a ciertos patrones como por

ejemplo: cambio de vocal (*begin/began*), mantenimiento del infinitivo (*put/put*) o cambio de la última consonante (*send/sent*).

Según Marslen-Wilson y Tyler [1998], los verbos irregulares en inglés son tan sólo unos 160 aproximadamente mientras que existen más de 10.000 verbos regulares. Por tanto, el pasado de los verbos ingleses es una flexión predominantemente regular. Sin embargo, las formas irregulares se dan con mucha más frecuencia que las formas regulares [Pinker, 1999]. Por ejemplo, Pinker [1999] apunta que los 10 verbos más utilizados en inglés son irregulares (datos obtenidos de un corpus de más de un millón de palabras [Francis y Kucera, 1982]). De este modo, la distribución de frecuencias de las formas regulares e irregulares en inglés es muy distinta, factor que, como se verá más adelante, facilita enormemente su aprendizaje. En conclusión, el sistema morfológico verbal del inglés se caracteriza por su simplicidad, característica que le distingue de la mayoría de lenguajes [Ragnarsdottir et al., 1999]. Esta simplicidad se puede resumir en cuatro puntos principales:

1. En primer lugar muchas características gramaticales no se reflejan en las formas flexionadas. Por ejemplo, la persona sólo es reflejada en el caso de la tercera persona del singular. El aspecto es solamente reflejado en el presente continuo y categorías como el modo no son reflejadas en términos de sufijos. Este no es el caso en muchos otros idiomas como el francés [Prevost, 2009] o el castellano [Alcoba, 1999].
2. En segundo lugar, como consecuencia de lo anterior, el número de sufijos utilizados en inglés es muy pequeño. Tan sólo se usa el sufijo -s para la tercera persona del singular del presente, el sufijo -ed para el pasado y el participio y el sufijo -ing para el presente continuo. Sin embargo, el castellano presenta más de 40 sufijos diferentes [Alcoba, 1999].
3. Además, el sistema verbal inglés no está organizado en conjugaciones (conjuntos de verbos que se flexionan de la misma manera). Mientras que otros idiomas presentan distintas conjugaciones (como el alemán [Nakisa y Hahn, 1996]), el griego [Stephany, 1997] o el castellano [Alcoba, 1999]), todas las flexiones en inglés se basan en una única regla.
4. Por último, la distribución de frecuencias de las formas regulares e irregulares es extremadamente distinta. La mayor parte de los verbos ingleses son regulares. Sin embargo, la frecuencia de uso de las formas irregulares es, también con diferencia, mucho mayor. En otros sistemas flexivos, como el plural alemán [Nakisa y Hahn, 1996], las excepciones son mucho más frecuentes que los casos regulares, lo cual plantea un reto añadido al proceso de adquisición.

3.1.2. Estudios empíricos sobre la adquisición de la morfología verbal inglesa

Esta sección presenta y discute una serie de resultados empíricos relacionados con la adquisición de la morfología verbal inglesa. En el contexto de esta tesis, estos fenómenos observados constituyen uno de los objetivos del proceso de modelado. La tabla 3.1 recoge los fenómenos modelados y el estudio empírico que se ha tomado como referencia.

Tabla 3.1: Fenómenos empíricos observados en la adquisición de la morfología verbal inglesa.

	Fenómeno	Estudio empírico
1	Aprendizaje en forma de U	Marcus et al. [1992]
2	Errores típicos	Marcus et al. [1992]; Xu y Pinker [1995]
	a) Error tipo I: Sobrerregularizaciones	
	b) Error tipo II: Errores de doble marca	
	c) Error tipo III: Otros errores	
3	Interacción frecuencia/regularidad	Maratsos [2000]; van der Lely y Ullman [2001]
4	Generalización	van der Lely y Ullman [2001]

El estudio más conocido, sistemático y detallado sobre el desarrollo de la morfología verbal en niños ingleses es, probablemente, el llevado a cabo por Marcus et al. [1992]. El estudio consistió en el análisis de 630 muestras de habla espontánea de 25 niños en un rango de edad de entre 1 año y 3 meses y 5 años y dos meses¹. Las muestras se dividen en muestras longitudinales de 10 niños en ese rango de edad y muestras transversales de otros 15 niños más. La mayor parte de los datos está disponible en la base de datos CHILDES [MacWhinney, 2000]. Los otros tres estudios utilizados son los de Xu y Pinker [1995], Maratsos [2000] y van der Lely y Ullman [2001]. El estudio de Xu y Pinker [1995] trata de ahondar en el trabajo iniciado por Marcus et al. [1992] prestando atención a los tipos de errores menos frecuentes. En la mayor parte de los casos, estos errores (como por ejemplo *bring* - *brang**) no han sido tenidos en cuenta. Sin embargo, a pesar de su poca frecuencia, pueden aportar información relevante acerca del proceso de adquisición de la morfología verbal. El estudio de Maratsos [2000] analiza los datos recogidos por Marcus et al. [1992] desde distintos puntos de vista. En particular, en este trabajo se utilizará su análisis de los efectos que tienen en los errores de los niños dos factores: la frecuencia de uso de las distintas formas verbales y su regularidad. Por su parte, van der Lely y Ullman [2001] investigan la producción de formas regulares e irregulares, tanto existentes como inventadas, en niños con desarrollo normal y niños con TEL. De particular interés para este trabajo de tesis es su estudio de los efectos de la frecuencia en las formas tanto regulares

¹En el ámbito de la lingüística y psicolingüística estas edades se referencian como “1;3” y “5;2” respectivamente. A partir de ahora, se usará esa notación en el texto.

como irregulares y su estudio de la generalización de los patrones regulares e irregulares a formas verbales inventadas y, por tanto, nunca antes escuchadas por los niños.

En las siguientes subsecciones, se muestra un resumen de las conclusiones obtenidas sobre cada fenómeno así como una discusión sobre la importancia a nivel teórico de cada uno de ellos.

3.1.2.1. Aprendizaje en forma de U

La adquisición de las flexiones irregulares en inglés no es un proceso lineal sino que la curva de aprendizaje describe una forma de U (véase la figura 3.1) en la que se pueden distinguir tres etapas bien diferenciadas [Marcus et al., 1992]. En una primera etapa, el niño es capaz de flexionar muy pocos verbos irregulares pero apenas comete errores. Esto se debe a que el niño produce tan sólo aquellas formas que ha sido capaz de memorizar, sin recurrir a ningún tipo de proceso productivo. En una segunda etapa el niño comienza a adquirir cierto conocimiento sobre los procesos regulares que rigen la morfología verbal. En el caso del inglés, comienza a detectar que existe un patrón (añadir el sufijo ‘-ed’ al lexema) que se repite en numerosas ocasiones. En esta etapa se empiezan a observar errores de sobreregularización. Errores como *breaked** o *buyed** en los que se aplica la regla regular a verbos irregulares. Conforme el patrón regular se va reforzando, los errores de sobreregularización son cada vez más frecuentes, dando lugar a la parte más baja de la U. Por último, en la tercera etapa, los errores de sobreregularización comienzan a descender hasta prácticamente desaparecer. Esto se debe a que las formas irregulares son cada vez más estables en la memoria del niño de modo que son reconocidas como excepciones.

En términos de valores absolutos, el estudio de Marcus et al. [1992] muestra un porcentaje de sobreregularización bajo y aparentemente estable en todos los niños. El valor medio es del 4,2 % en el habla espontánea de 25 niños con la única excepción de uno de ellos (Abe) que presenta una tasa de sobreregularización mucho mayor (que Marcus et al. [1992] atribuyen a posibles artefactos en el proceso de medida). Sin embargo, los porcentajes de sobreregularización están siempre por debajo del 50 %.

3.1.2.2. Errores típicos

Los niños ingleses cometen principalmente dos tipos de errores en la flexión verbal (véase la proporción de errores de cada tipo en la tabla 3.2). El tipo de error más frecuente es el error de sobreregularización. Este error consiste en la aplicación de un sufijo regular

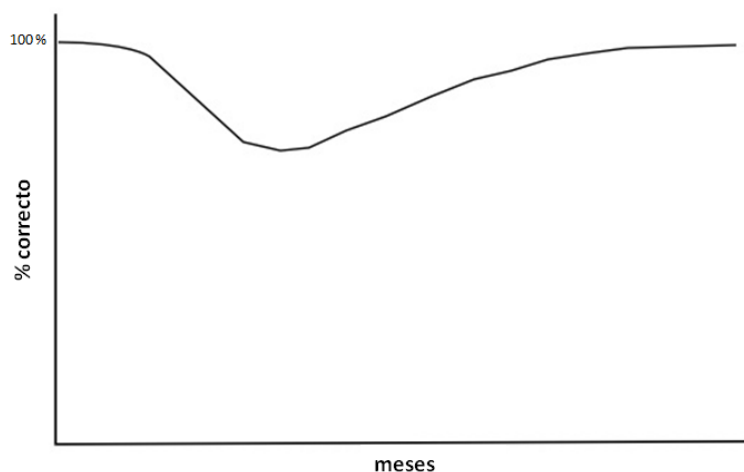


Figura 3.1: Curva de aprendizaje en forma de U

al lexema de un verbo irregular (por ejemplo *go/goed** o *break/breaked**). Como se ha visto en el caso anterior, estos errores están muy relacionados con el aprendizaje en forma de U. En una primera etapa, los niños apenas cometen este tipo de errores. Más adelante, cuando comienzan a ser conscientes de la existencia del patrón regular, los niños empiezan a aplicar dicho patrón a verbos irregulares de los que desconocen la flexión correcta. Finalmente, los errores de sobreregularización terminan por desaparecer.

Un segundo tipo de error presente en la adquisición de la morfología verbal inglesa son los llamados errores de doble marca (*blend errors* en la literatura inglesa). Estos errores se dan cuando los niños combinan la forma irregular correcta con el sufijo regular (por ejemplo *go/wented** o *break/broked**).

Tabla 3.2: Distribución de los tipos de errores en el estudio de Marcus et al. [1992]

Sobrerregularizaciones	Errores de doble marca
701 (85.6 %)	118 (14.4 %)

El tercer tipo de error encontrado se produce por la aplicación de un patrón por similitud fonológica. En su estudio, Xu y Pinker [1995] analizaron 20.000 formas verbales de pasado usadas por nueve niños de edades entre 0;7 y 8;0 (transcripciones obtenidas de la base de datos CHILDES). En este caso, su análisis no se centraba en los errores típicos de sobreregularización sino en errores de baja frecuencia como la sobreaplicación de patrones de cambio de vocal (*bring - brang**). Existen bastantes evidencias de que estos errores son provocados por la analogía fonológica con formas similares (el error anterior podría

producirse por analogía con la forma *sing - sang*). Como se ha comentado anteriormente, existen patrones fonéticos dentro de los verbos irregulares. La existencia de estos grupos de similitud fonética puede hacer que verbos que realmente no pertenecen al grupo sean conjugados como si pertenecieran a él por medio de mecanismos de analogía. Como se verá más adelante, en castellano también se han encontrado este tipo de errores. Por ejemplo algunos niños produjeron la forma *poner - punieron** posiblemente, por analogía con *poder - pudieron*.

Según Xu y Pinker [1995], estos errores suponen tan sólo un 0.19 % del total de errores. De ahí que, en la mayoría de modelos existentes, no hayan sido tenidos en cuenta. Sin embargo, a pesar de esta baja frecuencia, estos errores pueden ser fundamentales a la hora de definir los procesos involucrados en la producción de formas flexionadas. Por ejemplo, los casos anteriores muestran que el proceso de producción de una forma verbal implica algún tipo de analogía a nivel fonético.

3.1.2.3. Interacción frecuencia/regularidad

La frecuencia de uso de las distintas formas verbales es un factor determinante a la hora de producirlas correctamente aunque su influencia no es igual en el caso de las formas regulares e irregulares [Marcus et al., 1992; Maratsos, 2000; Ellis y Schmidt, 1998]. Este fenómeno se ha venido a llamar la *interacción frecuencia/regularidad*. Ellis y Schmidt [1998] sugieren que existe un patrón de desarrollo en dicha interacción. En una primera etapa los efectos de la frecuencia son muy pronunciados tanto para las formas regulares como para las irregulares. Es decir, las formas muy frecuentes se flexionan correctamente en ambos casos, mientras que las formas poco frecuentes presentan gran cantidad de errores. Este efecto de la frecuencia se va atenuando durante el desarrollo, pero dicha atenuación se da más lentamente en el caso de los irregulares. En otras palabras, en etapas posteriores, las formas regulares de alta y baja frecuencia presentan un porcentaje de acierto similar. Sin embargo, en las formas irregulares sigue existiendo una amplia diferencia entre las de alta y las de baja frecuencia.

Para estudiar la distribución de los errores de sobrerregularización dependiendo de la frecuencia de las formas flexionadas, Maratsos [2000] calculó las tasas de sobrerregularización en grupos de verbos de distintas frecuencias. Los verbos fueron agrupados atendiendo a su frecuencia en las oraciones dirigidas a los niños. Las tasas de sobrerregularización obtenidas para cada grupo se muestran en la tabla 3.3 (tomada de Maratsos [2000]). La conclusión es evidente. A pesar de algunas diferencias individuales (como se ha comentado, Abe presenta tasas de sobrerregularización más altas), los tres niños produjeron más erro-

res de sobrerregularización en los grupos de baja frecuencia. Los valores medios para los verbos de menor frecuencia son de un 47% mientras que en los verbos de alta frecuencia se obtuvieron valores inferiores al 10%.

Tabla 3.3: Tasas de sobrerregularización en verbos ingleses de diferentes frecuencias de uso (extraída de Maratsos [2000])

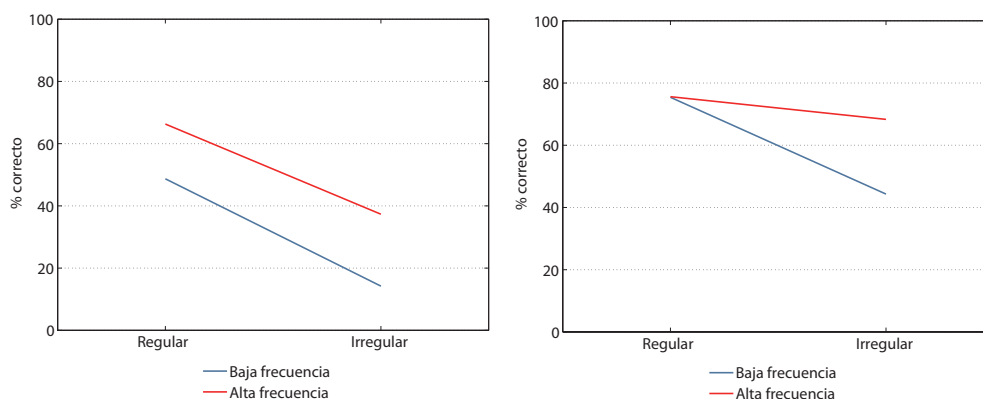
	Frec. = 1 - 9		Frec. = 10 - 49		Frec. = 50 - 99		Frec. = 100+	
	Número*	Tasa	Número*	Tasa	Número*	Tasa	Número*	Tasa
Abe	40	0.58	14	0.45	5	0.25	6	0.18
Adam	22	0.54	12	0.01	10	0	7	0.01
Sarah	33	0.29	14	0.11	5	0.05	1	0
Media	31.67	0.47	13.33	0.19	6.67	0.1	4.67	0.06

*Número de formas irregulares diferentes utilizadas en cada uno de los rangos de frecuencias

Con el objetivo de comprobar que estos efectos no se observan en las formas regulares, se usarán los resultados del estudio de van der Lely y Ullman [2001]. En ese estudio, se midió el porcentaje de formas correctas de alta y baja frecuencia tanto regulares como irregulares en tres etapas distintas del desarrollo (edades medias: 5;9, 6;11 y 7;11). Los resultados del estudio pueden verse en la figura 3.2. En una primera etapa pueden observarse los efectos de la frecuencia tanto en las formas regulares como las irregulares. Sin embargo, en las etapas posteriores, esos efectos se atenúan casi totalmente para las formas regulares, mientras que en el caso de las formas irregulares la atenuación es mucho más lenta.

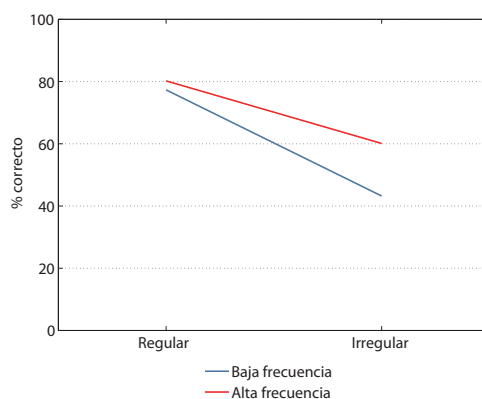
3.1.2.4. Generalización

A partir de cierta etapa en el desarrollo, los niños son capaces de aplicar morfemas verbales conocidos a palabras nuevas. Esta capacidad de generalización fue mostrada por primera vez en el estudio de Berko [1958]. En este estudio, se pedía a los niños que produjeran distintas flexiones (como el pasado o la tercera persona del singular del presente) de palabras nuevas (por ejemplo *wug*). Estudios posteriores [Prasada y Pinker, 1993; van der Lely y Ullman, 2001] distinguen entre generalización regular e irregular. Cada uno de estos términos se refiere a la flexión de palabras nuevas similares fonológicamente a verbos regulares e irregulares respectivamente. Prasada y Pinker [1993] mostraron efectos de la similitud fonológica en ambos tipos de generalización. Sin embargo, dichos efectos eran más pronunciados en la generalización irregular. En este trabajo se tomarán como referencia los resultados de van der Lely y Ullman [2001] que analizaron la capacidad de generalización de 36 niños divididos en tres grupos de edad (con edades medias de 5;9, 6;11 y 7;11). Los resultados obtenidos en la generalización regular e irregular pueden verse en la figura 3.3.



(a) Primera etapa (edad media: 5;9)

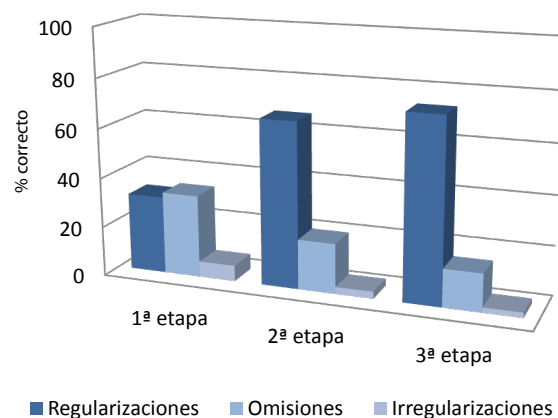
(b) Segunda etapa (edad media: 6;11)



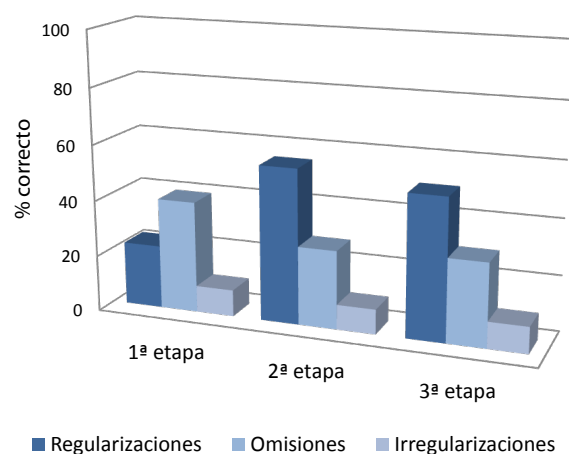
(c) Tercera etapa (edad media: 7;11)

Figura 3.2: Interacción frecuencia/regularidad en el pasado del inglés en las tres etapas de desarrollo del estudio de van der Lely y Ullman [2001]

Al igual que en el estudio de Prasada y Pinker [1993], los resultados muestran que la similitud fonológica juega un papel determinante a la hora de flexionar verbos nuevos. Como se ha observado al analizar los tipos de errores, los niños tienden a sobrerregularizar las formas que no conocen. En general, ante una forma nueva como *wug*, los niños tienden a producir *wugged*. Sin embargo, al controlar la similitud fonológica, esta tendencia se puede modular. En el caso de la generalización regular, los niños producen formas regulares en un gran porcentaje de los casos. Por ejemplo, dado el verbo *brop* que es muy similar fonéticamente a verbos regulares como *drop* o *rob*, cuyos pasados son *dropped* y *robbed* respectivamente, los niños tienden a producir la forma *bropped*. Sin embargo, en el caso de la generalización irregular, el número de irregularizaciones aumenta frente al número de regularizaciones. Por ejemplo, ante un verbo nuevo como *crive* que es muy similar a



(a) Generalización de formas similares a formas regulares



(b) Generalización de formas similares a formas irregulares

Figura 3.3: Generalización regular 3.3(a) e irregular 3.3(b) para los tres grupos de edad del estudio de van der Lely y Ullman [2001] (edades: 5;9, 6;11 y 7;11 respectivamente)

verbos irregulares como *drive* o *dive*, cuyos pasados son *drove* y *dove* respectivamente, los niños tienden a producir la forma irregular *crove* con mayor frecuencia que en el caso anterior. Aunque, como se ve en la figura 3.3(b), las regularizaciones (*crived*) siguen siendo mayoritarias.

3.1.3. Morfología verbal del castellano

Los verbos españoles se forman mediante la adhesión al lexema de un determinado sufijo que marca el modo (indicativo, subjuntivo o imperativo) el tiempo (presente, pasado o futuro), el aspecto (perfectivo o imperfectivo) el número (singular o plural) y la persona

(primera, segunda o tercera). Los verbos españoles se dividen en tres conjugaciones. La primera conjugación está formada por los verbos cuyo infinitivo termina en ‘-ar’, la segunda por los verbos cuyo infinitivo termina en ‘-er’ y la tercera la forman los verbos terminados en ‘-ir’. La primera conjugación es, con diferencia, la que abarca un mayor número de verbos alcanzando 9706. Mientras que la segunda y tercera conjugaciones tiene 712 y 740 verbos respectivamente [Clahsen et al., 2002]. Cada una de estas conjugaciones sigue un paradigma flexivo que funciona como modelo para los verbos regulares de cada conjugación (véase un extracto de dichos paradigmas en el apéndice A y los paradigmas completos en Aguado-Orea [2004]). Al igual que en inglés, existen formas verbales que no siguen dichos paradigmas. Son las llamadas formas irregulares. Por último, existe un tipo de formas de naturaleza controvertida. Son las formas diptongadas. Estas formas presentan un único cambio respecto al paradigma regular: en ellas se cambia una vocal del lexema por un diptongo. Por ejemplo, a partir del verbo *jugar* se genera la forma verbal *juego* que introduce el diptongo ‘ue’ sustituyendo a la vocal ‘u’ de la que sería su forma regular *jugo**. Algunos autores señalan que las formas diptongadas pueden derivarse de reglas meramente fonológicas y que, por lo tanto, no deben considerarse formas irregulares. Otros autores consideran que, al no seguir los paradigmas regulares estas formas han de ser consideradas irregulares. Dado este carácter controvertido, en este trabajo se adopta el enfoque de Clahsen et al. [2002] que hace un análisis separado de estas formas centrando el grueso de su trabajo en las formas no diptongadas.

Como se ha comentado anteriormente, el castellano es un idioma altamente flexivo. Los verbos españoles pueden tener más de 40 posibles sufijos [Alcoba, 1999]. Sin embargo, esta gran cantidad de flexiones no es la única dificultad que presenta el sistema morfológico del castellano. La regularidad de las formas verbales es otra de sus características particulares. Las irregularidades se pueden dar en el lexema, en el sufijo o en ambas partes. Además, las irregularidades se distribuyen entre las diferentes formas de un mismo verbo de manera muy heterogénea. De este modo, un mismo verbo puede presentar formas regulares, y formas con distintos tipos de irregularidades. Un ejemplo de esto se puede ver en la tabla 3.4, en la que se muestran distintas formas del verbo ‘poner’ y como se distribuyen los patrones irregulares en el lexema y el sufijo.

En resumen, existe una clara distinción entre formas regulares e irregulares tanto en los procesos de formación del lexema como en los procesos de sufijación. Por tanto, al aprender a flexionar un verbo, los hablantes del castellano han de obtener el lexema y añadirle el sufijo adecuado. Como se ha señalado, en castellano existen más de 40 posibles sufijos para cada verbo. Y además, la flexión en castellano depende de muchas más características como

Tabla 3.4: Ejemplo de la distribuciones de distintos patrones irregulares en varias formas del verbo ‘poner’

Forma	Lexema	Sufijo	Modo-Tiempo-Aspecto	Número-Persona
PON-ES	Regular	Regular	Ind.-Presente-Imperf.	2 ^a singular
PONG-O	Irregular	Regular	Ind.-Presente-Imperf.	1 ^a singular
PON-ÍA	Regular	Regular	Ind.-Pasado-Imperf.	1 ^a singular
PUS-E	Irregular	Irregular	Ind.-Pasado-Perf.	1 ^a singular

son: conjugación, modo, tiempo, aspecto, número y persona. Por tanto, se puede concluir que el sistema flexivo del castellano es, con diferencia, mucho más complejo que el del inglés. Y, de este modo, puede ofrecer un punto de vista más interesante acerca de los mecanismos subyacentes a la flexión verbal.

3.1.4. Estudios empíricos sobre la adquisición de la morfología verbal española

Esta sección presenta y discute una serie de resultados empíricos relacionados con la adquisición de la morfología verbal en castellano. En el contexto de esta tesis, estos fenómenos observados constituyen uno de los objetivos del proceso de modelado. La tabla 3.5 recoge los fenómenos modelados y el estudio empírico que se ha tomado como referencia.

Tabla 3.5: Fenómenos empíricos observados en la adquisición de la morfología verbal española.

	Fenómeno	Estudios
1	Aprendizaje en forma de U	Clahsen et al. [2002]
2	Errores típicos	Clahsen et al. [2002]
	a) Error tipo I: Sobrerregularizaciones	
	b) Error tipo II: Irregularizaciones	
	c) Error tipo III: Otros errores	
3	Interacción frecuencia/regularidad	Clahsen et al. [2002]
4	Generalización	Pérez-Pereira [1989]

Desde mediados de los 80, la adquisición de la morfología verbal en niños hispano-parlantes ha sido ampliamente investigada [Hernández-Pina, 1984; López-Ornat, 1994; Johnson, 1995; Radford y Ploennig-Pacheco, 1995; Serrat y Aparici, 1999]. Sin embargo, el primer estudio longitudinal y exhaustivo comparable al de Marcus et al. [1992], no fue llevado a cabo hasta 2002 por Clahsen et al. [2002]. En este estudio, los autores tratan de arrojar luz sobre la cuestión de si el modelo dual se extiende al castellano o no. El estudio consiste en 64 muestras de habla espontánea de 15 niños en un rango de edades entre los

1;7 años y los 4;7 años (véase Clahsen et al. [2002] para una explicación más detallada de los participantes). El estudio cuenta con muestras longitudinales de 4 niños y muestras transversales de los otros 11 niños. La mayor parte de las transcripciones utilizadas se encuentran disponibles en la base de datos CHILDES [MacWhinney, 2000]. En las siguientes subsecciones, se muestra un resumen de las conclusiones obtenidas sobre cada fenómeno así como una discusión sobre la importancia a nivel teórico de cada uno de ellos.

3.1.4.1. Aprendizaje en forma de U

El estudio de Clahsen et al. [2002] extiende al castellano los resultados obtenidos por Marcus et al. [1992] para el inglés. Al igual que en inglés, en español, la adquisición de la morfología verbal no sigue un desarrollo lineal sino un desarrollo en forma de U en el que se distinguen las tres etapas ya comentadas.

Los resultados de Clahsen et al. [2002] muestran una tasa media de sobrerregularización baja y relativamente estable del 3,4 % en las muestras de habla espontánea. Esta tasa es muy similar a la obtenida por Marcus et al. [1992] en inglés. Del mismo modo, en castellano se obtuvo una tasa de sobrerregularización más alta para las formas verbales en pasado (14 %) que para las formas verbales en presente (1.5 %). Esta diferencia puede deberse a la diferente distribución de formas regulares e irregulares en los distintos tiempos verbales. El pasado presenta muchas más formas irregulares, es decir más oportunidades de producir errores, que el presente.

3.1.4.2. Errores típicos

La tabla 3.6, extraída de Clahsen et al. [2002], muestra los tipos de errores presentes en el habla de los niños que participaron en ese estudio, así como su distribución de frecuencias.

Tabla 3.6: Distribución de los tipos de errores en el estudio de Clahsen et al. [2002]

A.	Errores en el lexema		B.	Errores en el sufijo	
I.	Sobrerregularizaciones	116	I.	Sobrerregularizaciones	132
			a.	Sobreaplicaciones de la 1ª conj.	8
			b.	Regularizaciones	124
II.	Irregularizaciones	1	II.	Irregularizaciones	0
III.	Otros errores	3	III.	Otros errores	1
<i>Total</i>		120	<i>Total</i>		133

El tipo de error más común, con diferencia, son las sobrerregularizaciones. Este tipo de errores consiste en la sustitución de lexema o sufijo irregular por la correspondiente forma regular. Los errores de sobrerregularización en el sufijo se dividen en dos tipos: el típico error de sobrerregularización y las sobreaplicaciones de sufijos de la primera conjugación a verbos que pertenecen a la segunda o tercera conjugación. Por ejemplo, algunos niños conjugan la primera persona del singular del pasado del verbo *traer* como *trajé** en lugar de la forma correcta *traje*. Esto se debe a la aplicación del sufijo *-é* correspondiente a la primera persona del singular del pasado de la primera conjugación.

Los errores de irregularización consisten en la aplicación de una forma irregular a un verbo que realmente es regular. Como se puede observar en la tabla 3.6 son prácticamente inexistentes. Es importante señalar que todos los errores de irregularización se dieron en formas verbales de un determinado tiempo que presenta formas irregulares. Ningún verbo con un paradigma completamente regular fue irregularizado. Por ejemplo, uno de los niños produjo la forma verbal *cayí** en lugar de la forma correcta *caí*. Este tipo de errores parece deberse a la aplicación del lexema de la tercera persona del singular de ese mismo tiempo (nótese que dicha forma verbal es *cayó*).

Como ya se ha comentado anteriormente, las formas diptongadas se analizarán de forma separada dado su carácter controvertido. Sin embargo, es interesante señalar que todos los errores presentes en ese tipo de formas se deben a la aplicación del patrón regular (por ejemplo, produciendo *juga** en lugar de *juega*). Sin embargo el proceso inverso, la diptongación de una forma regular (por ejemplo, para el verbo *chupar*, la producción de *chuepa** en lugar de la forma regular correcta *chupa*), no se dio nunca en el estudio. Un total de 107 formas de las 603 formas diptongadas encontradas en el estudio fueron regularizadas pero ni una sola forma regular fue diptongada.

Finalmente existen otros tipos de errores (como en el caso del inglés, con una frecuencia extremadamente baja) debidos a la sustitución de una forma irregular por otra forma irregular fonológicamente similar. Un ejemplo de este tipo de errores se encuentra con la forma *punieron** producida en lugar de la forma *pusieron*, probablemente por analogía con *pudieron* (nótese que los respectivos infinitivos *poner* y *poder* son muy similares en términos de fonología). Estos errores producidos por similitud fonológica constituyen tan solo un 2 % del total de errores producidos por los niños.

3.1.4.3. Interacción frecuencia/regularidad

Al igual que en inglés, los errores de sobreregularización no están distribuidos de la misma forma entre los verbos irregulares. La frecuencia de cada verbo irregular juega un papel fundamental en el proceso de sobreregularización. Como puede verse en la tabla 3.7, los niños estudiados por Clahsen et al. [2002] presentaron tasas de sobreregularización más altas para aquellos verbos con una baja frecuencia de aparición en la entrada (como, por ejemplo, la forma *(cuelgo)* frente a los verbos de alta frecuencia (como, por ejemplo, la forma *puedo*). La tasa de sobreregularización media para los verbos con una frecuencia de aparición entre 1 y 9 fue del 16.6 %. Mientras que los verbos con frecuencias de entre 10 y 49 presentaron una tasa de sobreregularización media del 4.4 %. Las tasas de sobreregularización de los verbos de mayor frecuencia estuvieron siempre por debajo del 2 %.

Tabla 3.7: Tasas de sobreregularización en verbos españoles de diferentes frecuencias de uso (extraída de Clahsen et al. [2002])

	Frec. = 1 - 9		Frec. = 10 - 49		Frec. = 50 - 99		Frec. = 100+	
	Número*	Tasa	Número*	Tasa	Número*	Tasa	Número*	Tasa
Idaira	31	0.15	5	0.02	0	-	0	-
Koki	22	0.24	8	0.11	0	-	0	-
María	24	0.11	9	0.003	4	0	6	0.02
Media	25.67	0.17	7.33	0.044	1.33	0	2	0.02

*Número de formas irregulares diferentes utilizadas en cada uno de los rangos de frecuencias

3.1.4.4. Generalización

El estudio más completo sobre la generalización de formas nuevas en castellano es el realizado por Pérez-Pereira [1989]. En él se aplicó el enfoque de Berko [1958] a 109 niños castellanoparlantes de entre 3 y 6 años de edad. Los participantes fueron divididos en 4 grupos de edades medias: 3;3, 4;8, 5;8 y 6;3. A cada uno de los participantes se le presentaron varios infinitivos artificiales y se le pedía que conjugara la tercera persona del singular de distintos tiempos, entre ellos el pretérito perfecto simple. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.8 (extraída de Pérez-Pereira [1989]) y en la gráfica 3.4.

De los resultados obtenidos se pueden obtener dos conclusiones principales:

- Los niños de tres años presentan tasas de regularización muy por debajo de las de los otros grupos. Este hecho muestra simplemente que a esa edad, las reglas regulares aún no han sido adquiridas

Tabla 3.8: Proporción de aciertos en la generalización regular en castellano para los distintos grupos de edad del estudio de Pérez-Pereira [1989]

Grupo de edad	3	4	5	6
1ª conj.	0.42	0.92	0.93	0.96
2ª conj.	0.21	0.37	0.48	0.62
3ª conj.	0.31	0.64	0.71	0.78
Total	0.32	0.64	0.71	0.78

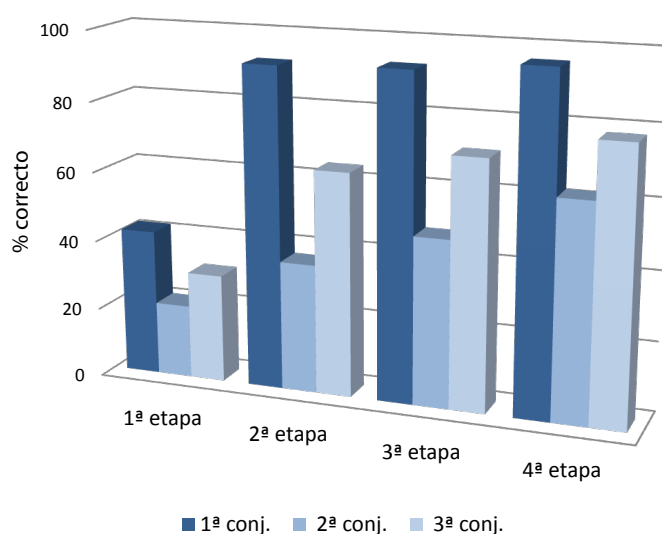


Figura 3.4: Generalización regular en castellano para los distintos grupos de edad del estudio de Pérez-Pereira [1989] (edades: 3;3, 4;8, 5;8 y 6;3 respectivamente)

- Los niños presentan tasas de regularización mucho más altas para los verbos de primera conjugación. Por ejemplo, la forma *autó* del verbo de 1ª conjugación *autar* se produce más frecuente que la forma *cobí* del verbo de la segunda conjugación *cober*. Como se ha comentado, la mayor parte de los verbos en castellano pertenecen a la 1ª conjugación y, además, la 1ª conjugación presenta mucha menos irregularidad. Estos dos factores facilitan enormemente la adquisición de la regla regular y, por tanto, su aplicación a formas nuevas. Además, también se observaron errores de aplicación del sufijo de primera conjugación *-ó* a las formas de segunda y tercera conjugación. Por ejemplo, se produjo en repetidas ocasiones la forma *llezó* para el verbo *llecer* en lugar de la forma esperada para un verbo de la segunda conjugación (*lleció*). Este hecho viene a demostrar que las reglas regulares de primera conjugación se adquieren antes que las de segunda y tercera (probablemente por las mismas razones que se acaban de comentar) y que el proceso de aplicación de las reglas es ruidoso y produce ciertos errores.

3.2. Metodología

Antes de comenzar el desarrollo de un modelo computacional, es necesario tomar una serie de decisiones previas sobre la metodología a seguir. En particular, es necesario detallar las herramientas a utilizar, las representaciones utilizadas para los distintos tipos de información, los datos de entrada al modelo y el procedimiento a seguir en los experimentos con el modelo. Un punto fundamental consiste en decidir el marco en el que se va a desarrollar el modelo. En este caso, el marco elegido es la arquitectura cognitiva ACT-R. Existen dos motivos fundamentales que justifican esta elección. En primer lugar se tuvo en cuenta que uno de los requisitos fundamentales del modelo era la plausibilidad psicológica. Por tanto, se decidió hacer uso de las arquitecturas cognitivas puesto que están inspiradas en multitud de evidencias neuropsicológicas. En particular, ACT-R es, probablemente, la arquitectura más empleada en la actualidad y, por tanto, su plausibilidad psicológica ha sido probada en multitud de áreas y tareas diferentes. En segundo lugar, como se comentó en el capítulo 2, en este trabajo se trata de dar una implementación del modelo declarativo / procedural cuyo núcleo radica en la separación física y funcional de las memorias declarativa y procedural. ACT-R constituye un marco perfecto para la implementación del modelo DP puesto que plantea esa misma separación como parte fundamental de su arquitectura. Por tanto, se decidió hacer uso de ACT-R y, a partir de ahí, se definieron las fuentes de información y sus representaciones, el vocabulario de entrada al modelo y el procedimiento a seguir en los experimentos con el modelo, puntos que son comentados en cada una de las siguientes subsecciones.

3.2.1. ACT-R

La principal herramienta con la que se ha contado para desarrollar el modelo es ACT-R² [Anderson, 2007]. ACT-R es una arquitectura cognitiva cuya plausibilidad psicológica ha sido probada en gran variedad de tareas. Su arquitectura general puede verse en la figura 3.5. Se divide en dos niveles: perceptual-motor y cognitivo que se organizan en módulos encargados de distintas tareas. La memoria de trabajo esta formada por la información procesada en cada momento por cada uno de los módulos. Desde otro punto de vista, ACT-R es considerada una arquitectura híbrida ya que incorpora un nivel simbólico y un nivel sub-simbólico que se explican a continuación.

3.2.1.1. Nivel simbólico.

En su nivel simbólico, ACT-R está compuesta por tres elementos básicos: módulos, buffers y un buscador de patrones.

²Acrónimo de “*The Adaptive Control of Thought - Rational*”

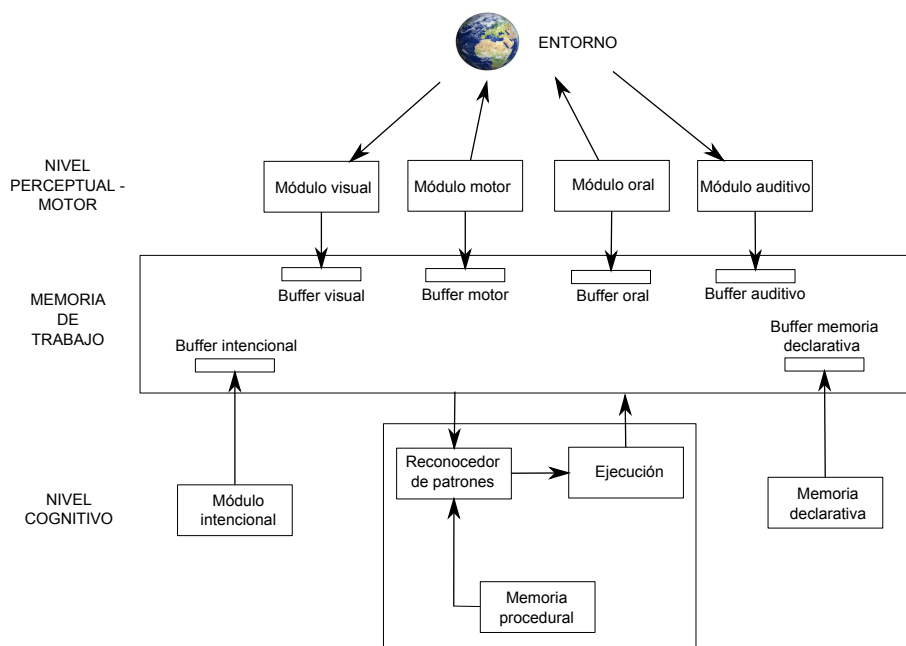


Figura 3.5: Arquitectura de ACT-R

Módulos. Los módulos de ACT-R son los encargados de almacenar y procesar diferentes tipos de información. Existen módulos percepto-motores, módulos de memoria y módulo de intención. Los **módulos percepto-motores** constituyen la interfaz con el mundo exterior. Existen módulos sensoriales para almacenar información visual y sonora, un módulo motor encargado de llevar a cabo diferentes acciones y un módulo encargado de la producción del habla. Existen dos **módulos de memoria**: memoria declarativa y memoria procedural. La memoria declarativa almacena hechos conocidos y todo tipo de memorias a largo plazo (como *Madrid es la capital de España* o *Los elefantes tienen trompa*) organizadas en las unidades básicas llamadas “*chunks*” que son conjuntos de pares campo-valor. La memoria procedural almacena reglas que representan el conocimiento sobre cómo hacer determinadas operaciones. Estos dos sistemas de memoria se corresponden perfectamente con los sistemas declarativo y procedural en los que se basa el modelo declarativo / procedural (sección 2.3.1). Por último, el **módulo intencional** almacena información sobre las intenciones y objetivos del modelo.

Buffers. ACT-R accede a los contenidos de los distintos módulos a través de buffers. Cada uno de los módulos tiene un buffer que sirve como interfaz y que almacena la información del modulo correspondiente que está siendo procesada en cada momento. El conjunto de buffers del sistema constituye la llamada memoria de trabajo.

Buscador de patrones. Este elemento es el encargado de determinar qué reglas de la memoria procedural pueden ser ejecutadas en cada ciclo. Para ello ha de comparar los condicionantes de cada una de las reglas con los campos de los *chunks* almacenados en los buffers de la memoria de trabajo.

3.2.1.2. Nivel subsimbólico.

El nivel subsimbólico controla el flujo de información entre los diferentes módulos del nivel simbólico. De especial interés para este trabajo son los conceptos de *activación* y *utilidad*, relacionados con la memoria declarativa y la memoria procedural respectivamente.

Activación. Cada uno de los *chunks* que forman la memoria declarativa tiene un valor de activación asociado basado en su utilización. Aquellos *chunks* que son usados frecuentemente o que han sido utilizados recientemente tienen un valor de activación más alto. La activación determina la probabilidad con la que un *chunk* será “recordado” desde la memoria declarativa así como el tiempo que tarda en ser recordado. El valor de la activación del *chunk* i se calcula de la siguiente forma:

$$A_i = B_i + \sum_k \sum_j W_{kj} S_{ji} + \sum_l PM_{li} + \epsilon \quad (3.1)$$

Por tanto, el valor de activación tiene cuatro componentes bien diferenciados: activación base (B_i), activación contextual ($\sum_k \sum_j W_{kj} S_{ji}$), activación por similitud ($\sum_l PM_{li}$) y ruido (ϵ).

- **Activación base (B_i).** Este valor recoge los efectos de la repetición y el olvido. Cuantas más veces se repite o se utiliza un determinado hecho, mayor es el valor de activación base. Mientras que, cuanto más lejanas en el tiempo sean dichas repeticiones, menor será el valor, debido al olvido. La fórmula para calcular el valor de activación base es la siguiente:

$$B_i = \ln\left(\sum_{j=1}^n t_j^{-d}\right) \quad (3.2)$$

donde n es el número de repeticiones del *chunk* i , t_j es el tiempo transcurrido desde la j -ésima repetición del *chunk* y d es el valor del factor de olvido.

- **Activación contextual.** La memoria de trabajo proporciona un contexto en el cual se producen cada una de nuestras peticiones a la memoria declarativa. Este contexto, influye en la activación de los *chunks* de dicha memoria y, por tanto, en el hecho que finalmente es recordado. Los *chunks* en los distintos buffers de la memoria de trabajo propagan cierta activación a los *chunks* de la memoria declarativa con los que tienen algo en común. Esta propagación se calcula mediante la fórmula:

$$\sum_k \sum_j W_{kj} S_{ji} \quad (3.3)$$

donde k es el número de buffers de la memoria de trabajo que contienen un *chunk* en el momento de realizar la petición a la memoria declarativa. j son los campos que se encuentran en el *chunk* del buffer k . W_{kj} es el peso otorgado a cada uno de los campos del buffer k (por defecto a todos los campos se les atribuye el mismo peso). Y S_{ji} es la fuerza de la asociación existente entre el *chunk* j -ésimo y el *chunk* cuya activación se quiere calcular.

- **Activación por similitud.** Este mecanismo, conocido en inglés como *partial matching*, permite recordar *chunks* que no son exactamente iguales al que se busca. El valor de activación por similitud es una penalización que es mayor cuanto mayor es la diferencia entre los *chunks* comparados. La fórmula para calcularlo es:

$$\sum_l P M_{li} \quad (3.4)$$

donde l es el número de campos en la petición a la memoria, P es el peso otorgado a la similitud de cada campo comparado y M_{li} es la medida de similitud entre el campo l de la petición a la memoria y el valor del campo correspondiente del *chunk* cuya activación se está calculando. Este valor ha de estar entre 0 y -1, siendo 0 para dos campos exactamente iguales.

- **Ruido.** El componente de ruido de la activación se obtiene a partir de dos valores. El primero es un factor de ruido fijo, que afecta de igual forma a todos los *chunks* de la memoria declarativa. El segundo es un factor de ruido instantáneo que se obtiene cada vez que se calcula la activación de un *chunk*. De este modo, el mecanismo de recuerdo tiene un componente probabilístico que hace que no siempre se recuerden las mismas cosas.

De esta forma, cada vez que se realiza una petición a la memoria declarativa, se calcula la activación de cada uno de los *chunks* y se devuelve el de mayor activación siempre y cuando ese valor esté por encima de un umbral determinado.

El mecanismo de aprendizaje de nuevos *chunks* es muy sencillo. Cada vez que se completa un objetivo (ya sea correcta o incorrectamente), se añade el *chunk* resultante a la memoria declarativa. Si este *chunk* ya existía, su activación es actualizada (como ya se ha observado, la activación depende el número de repeticiones de un *chunk* y de lo recientes que sean esas repeticiones). Del mismo modo, la activación del *chunk* decae si éste no es usado.

Utilidad. Las reglas almacenadas en la memoria procedural también tienen un elemento subsimbólico asociado denominado *utilidad*. La utilidad es una estimación del coste relativo y los beneficios de ejecutar una determinada regla. Del mismo modo que los *chunks*, cada vez que se pueden ejecutar varias reglas, aquella con la mayor utilidad asociada es la seleccionada.

Al igual que la activación, los valores de utilidad no son estáticos, sino que se van actualizando atendiendo a los procesos de aprendizaje definidos en ACT-R. Existen dos formas de aprendizaje de reglas en ACT-R: actualización de la utilidad de las reglas existentes y aprendizaje de nuevas reglas. La actualización de la utilidad se lleva a cabo a través de recompensas. Las recompensas pueden darse en varios momentos, por ejemplo, en un modelo de adquisición de la morfología verbal, cada vez que el modelo produce una forma verbal. La recompensa se propaga a todas las reglas que se han ejecutado entre una recompensa y la anterior. De esta manera, se refuerzan más aquellas reglas que alcanzan un objetivo con una mayor recompensa asociada (por ejemplo, en el caso de un modelo de la adquisición de la morfología verbal, se puede otorgar una mayor recompensa cuando se ha conseguido producir una forma verbal que cuando el modelo es incapaz de hacerlo). Sin embargo, aquellas reglas más distantes en el tiempo reciben menos recompensa. De este modo, las reglas que consiguen el objetivo más rápidamente recibirán un refuerzo mayor y serán, por tanto, elegidas en el futuro frente a reglas más lentas.

El valor de la utilidad se actualiza siguiendo la formula siguiente:

$$U_i(n) = U_i(n - 1) + \alpha[R_i(n) - U_i(n - 1)] \quad (3.5)$$

donde $U_i(n)$ es la utilidad de la regla i -ésima en el instante n . $R_i(n)$ es la recompensa recibida en ese instante y α es la tasa de aprendizaje del modelo.

El aprendizaje de nuevas reglas es el resultado de la especialización y la combinación de las reglas existentes. Cuando es ejecutada una regla que realiza una búsqueda en la memoria declarativa y, a continuación, se ejecuta otra que comprueba los resultados de esa búsqueda, ambas reglas se pueden combinar sustituyendo la búsqueda en memoria por los resultados de la misma. Si la regla creada ya existe en la memoria procedural, su valor de utilidad es incrementado. Inicialmente, la regla se añade a la memoria procedural con un valor de utilidad inicial de 0. Por tanto, en un primer momento, esta nueva regla no se ejecutará dado que las reglas existentes tienen una mayor utilidad (esto refleja el hecho de que para aprender una nueva regla es necesario observarla en múltiples ocasiones). Si la regla es realmente útil, se volverá a recrear en repetidas ocasiones, aumentando su utilidad y pudiendo competir finalmente con las reglas que existían anteriormente. De hecho, al ser una regla que alcanza el mismo objetivo de una forma más rápida que las reglas existentes (puesto que evita la búsqueda en memoria), recibirá recompensas más altas y acabará imponiéndose a las reglas iniciales.

3.2.1.3. Dinámica

ACT-R es una arquitectura orientada a objetivos. En cada ciclo, ACT-R determina qué reglas de la memoria procedural encajan con los contenidos de los diferentes buffers (memoria de trabajo) y selecciona la regla con una mayor utilidad asociada. Esta regla modifica los contenidos de los buffers (por ejemplo, haciendo una petición a la memoria declarativa o pidiendo al módulo visual que cambie el punto de atención) y a continuación, se determinan de nuevo las reglas que encajan con el contenido de los buffers repitiendo este ciclo hasta que se alcanza el objetivo.

Hay muchas más características de ACT-R que no han sido recogidas en este repaso. Para un análisis más exhaustivo de ACT-R pueden consultarse sus manuales y materiales asociados en su página web: <http://act-r.psy.cmu.edu/>.

3.2.2. Representación de la información lingüística en los *chunks* del modelo

El modelo propuesto usa tres fuentes de información: fonológica, léxico-semántica y gramatical. Estos tres tipos de información son almacenados, como se verá a continuación, en los *chunks* de la memoria declarativa que representan a cada uno de los verbos. Estos tipos de información se representan usando el mismo esquema en castellano y en inglés. Sin embargo, los detalles de cada uno de ellos dependen de las características de cada uno de los lenguajes. Dichos detalles se explican a continuación.

3.2.2.1. Información fonológica

La representación de la información fonológica utilizada se basa en la codificación distribuida usada por Thomas y Karmiloff-Smith [2003] y Karaminis y Thomas [2010]. Este esquema codifica cada uno de los fonemas en base a una serie de características articulatorias definidas para cada idioma. Así, cada fonema viene representado por una lista de unos y ceros donde un uno en la posición i -ésima indica que el fonema posee la característica i -ésima. Este esquema de representación distribuido es más psicológicamente plausible que el sistema de representación “*Wickelfeature*” introducido por Rumelhart y McClelland [1986] y que ha sido usado en varios modelos posteriores. Por ejemplo, el sistema “*Wickelfeature*” no es capaz de capturar la similitud fonológica entre dos palabras en las que cambie el orden de dos fonemas [Pinker y Prince, 1988], mientras que los esquemas de representación distribuidos no tienen ese problema. En el trabajo de Thomas y Karmiloff-Smith [2003] puede verse un estudio más completo sobre los distintos tipos de representaciones y cómo influye el número de características articulatorias en el cómputo de la similitud fonológica. A continuación se detallan los esquemas de representación utilizados para el inglés y para el castellano.

Inglés Este esquema codifica los 24 fonemas consonánticos y los 18 fonemas vocálicos del inglés en base a 19 características articulatorias (véase Fromkin et al. [2002] p. 242-259). Las tablas 3.9 y 3.10 recogen las representaciones de los fonemas consonánticos y vocálicos respectivamente.

Castellano El sistema fonético del castellano es mucho más reducido. Tan sólo tiene 20 fonemas consonánticos y 5 vocálicos. Para representarlos se usan 22 características articulatorias [D’introno et al., 1995]. Las tablas 3.11 y 3.12 recogen las representaciones de los fonemas consonánticos y vocálicos respectivamente. Nótese que cada uno de los fonemas, tanto consonánticos como vocálicos, está representado por 22 características articulatorias. Sin embargo, en castellano, 16 de esas características son exclusivamente consonánticas mientras que las otras seis son vocálicas. De este modo, los fonemas consonánticos tienen 6 ceros en las últimas posiciones mientras que los fonemas vocálicos comienzan con 16 ceros correspondientes a las 16 características consonánticas.

Similitud fonológica Como se ha comentado en las secciones 3.1.2 y 3.1.4, durante el proceso de adquisición del lenguaje, la analogía a nivel fonológico está presente. De ahí que se comentan errores como *punieron** o *brang**. Por tanto, además de definir la información fonológica que va a ser utilizada por el modelo, es necesario definir una forma de comparar las representaciones fonológicas de las distintas formas verbales o, en otras

Tabla 3.9: Representación de los 24 fonemas consonánticos del inglés.

	sonorante	consonántico	vocálico	fricativo sibilante	sonoro	labial	anterior	alveolar	velar	fricativo	nasal	lateral	posterior	alto	central	bajo	laxo	tenso	dipthongado	Ejemplo
/p/	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	spill
/b/	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	bill
/m/	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	mill
/f/	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	feel
/v/	0	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	veal
/θ/	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	thigh
/ð/	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	thy
/ʃ/	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	shop
/ʒ/	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	measure
/t/	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	still
/d/	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	dill
/n/	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	nil
/s/	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	seal
/z/	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	zeal
/tʃ/	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	church
/dʒ/	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	June
/k/	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	skill
/g/	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	gill
/ŋ/	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	ring
/h/	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	high
/l/	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	leaf

Tabla 3.10: Representación de los fonemas vocálicos del inglés

	sonorante	consonántico	vocalico	fricativo sibilante	sonoro	labial	anterior	alveolar	velar	fricativo	nasal	lateral	posterior	alto	central	bajo	laxo	tenso	dipthongado	Ejemplo
/i:/	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	beet
/e/	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	bait
/u:/	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	boot
/ə/	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	boat
/æ/	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	bat
/ʌ/	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	but
/aɪ/	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	bite
/ɔɪ/	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	boy
/ɪ/	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	by
/e/	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	bet
/ʊ/	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	foot
/ɔ:/	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	bought
/aʊ/	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	bout
/ɒ/	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	dog
/ɑ:/	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	bath
/ʊə/	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	tour
/ɛə/	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	hair
/ɹ/	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	about

Tabla 3.11: Representación de los fonemas consonánticos del castellano.

	<i>bilabial</i>	<i>labio-dental</i>	<i>interdental</i>	<i>dental</i>	<i>alveolar</i>	<i>palatal</i>	<i>velar</i>	<i>bilabio-velar</i>	<i>oclusiva</i>	<i>fricativa</i>	<i>affricada</i>	<i>nasal</i>	<i>lateral</i>	<i>vibrante múltiple</i>	<i>vibrante simple</i>	<i>sonora</i>
/p/	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
/b/	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
/m/	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
/f/	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
/θ/	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
/t/	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
/d/	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
/s/	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
/n/	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
/l/	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
/r/	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
/r/	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
/y/	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
/tʃ/	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
/ɲ/	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
/ʎ/	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
/k/	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
/g/	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1
/χ/	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1
/w/	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1

Tabla 3.12: Representación de los fonemas vocálicos del castellano.

	<i>cerrada</i>	<i>intermedia</i>	<i>abierta</i>	<i>anterior</i>	<i>central</i>	<i>posterior</i>
/a/	0	0	1	0	1	0
/e/	0	1	0	1	0	0
/i/	1	0	0	1	0	0
/o/	0	1	0	0	0	1
/u/	1	0	0	0	0	1

palabras, es necesario definir una función de similitud fonológica entre las representaciones de las distintas formas verbales. Para ello, se utiliza de nuevo el esquema de representación basado en posiciones utilizado en varios de los modelos anteriores [Thomas y Karmiloff-

Smith, 2003]. En este esquema, cada lexema es representado por 6 posiciones pudiendo albergar cada una un único fonema. El número de posiciones reservadas para el lexema o el sufijo no es determinante y depende únicamente de los casos concretos presentes en el vocabulario utilizado.

A la hora de definir una medida de similitud fonológica, es importante tener en cuenta que la importancia de la rima en dicha similitud. Análisis estadísticos sobre la naturaleza de las vecindades fonológicas en términos de similitud por rima (*hat* / *cat*), similitud consonántica (*hat* / *hit*) y similitud inicial (*hat* / *ham*) muestran que la mayor parte de los considerados vecinos fonológicos presentan una similitud por rima [Cara y Goswami, 2002]. Además, se han encontrado patrones similares en relación a la edad de adquisición: se adquieren antes las palabras con una rima similar a palabras ya aprendidas [Cara y Goswami, 2002]. Por tanto, a la hora de calcular la similitud fonológica de dos palabras o de sus componentes, es necesario tener en cuenta la rima. Para ello, en el esquema de representación utilizado, los fonemas se colocan de modo que el último fonema vocálico del lexema quede en la tercera posición empezando por la derecha. De este modo, quedan tres fonemas para la parte inicial del lexema (también llamada *onset*), uno para el fonema vocálico principal (también llamado *núcleo*) y dos para la parte final del lexema (también llamada *coda*). En este trabajo de tesis no se usaron palabras con lexemas o sufijos de más de 6 fonemas. Para los morfemas de menor longitud, se dejaron posiciones vacías donde corresponda. Seis posiciones más se reservan para el sufijo. Por ejemplo, los verbos *cab*er, *sab*er y *sentir* se representarían de la siguiente forma³:

cab	er	
sab	er	
sent	ir	

Con esta representación fonética de las palabras y sus componentes, se adaptó una sencilla función de distancia fonética a partir de la utilizada por Karaminis y Thomas [2010]: una ponderación de la distancia euclídea entre los vectores fonéticos de los dos elementos comparados. Así, siguiendo con el ejemplo anterior, al comparar los lexemas de los tres verbos: /*kab*/-, /*sab*/- y /*sent*/-, la distancia fonética entre /*kab*/ y /*sab*/ sería menor (puesto que su representación vectorial comparte muchas características articulatorias) que la distancia entre cualquiera de esas formas y /*sent*/.

³Las posiciones vacías se representan por cadenas de ceros de longitud igual al número de características articulatorias

3.2.2.2. Información léxico-semántica

La representación de la información léxico-semántica se basó en un esquema localizado: a cada uno de los verbos del vocabulario se le asignó un código que no comparte ningún tipo de información con el resto de códigos asignados a los otros verbos. Esta representación implica una influencia léxica más que semántica sobre la morfología (o, al menos, una influencia semántica modulada por la información léxica). El uso de un esquema distribuido basado en primitivas semánticas podría dar cabida a algún tipo de influencia puramente semántica. Sin embargo, Thomas y Karmiloff-Smith [2003] comprobaron que usando un esquema localizado se obtenía un mejor ajuste a los datos empíricos, sugiriendo la pobre o inexistente influencia de las primitivas semánticas en la adquisición y producción de la morfología.

3.2.2.3. Información gramatical

Al igual que la información léxico-semántica, la representación de la información gramatical se basó en un esquema localizado. Las representaciones en inglés y castellano tan sólo se diferencian en el conjunto de características gramaticales utilizadas:

Inglés Dada la simplicidad del sistema flexivo inglés tan sólo es necesario usar la información sobre el tiempo verbal y la de número y persona.

Castellano En el caso del castellano, se han de utilizar las características de modo, tiempo y aspecto (que se agrupan en una única categoría otorgando distintos códigos a las distintas combinaciones posibles) y las características de número y persona (que se agrupan de igual forma).

En la tabla 3.13 puede verse un ejemplo de la información que maneja el modelo para representar la forma verbal

3.2.3. Vocabulario

Inglés El vocabulario usado como entrada para el modelo es el mismo que el usado por Taatgen y Anderson [2002]. El vocabulario consiste en 478 formas verbales usadas por los niños o los padres participantes en el estudio de Marcus et al. [1992]. Cada una de esas formas tiene una frecuencia de uso asociada, extraída del corpus de Francis y Kucera [1982].

Tabla 3.13: Fuentes de información lingüística utilizadas por el modelo

Tipo de información	Campo	Valores de ejemplo
Semántica	Verbo	Cantar
Sintáctica	Conjugación	Primera
	Modo	Indicativo
	Tiempo	Presente
	Aspecto	Imperfectivo
	Número	Singular
	Persona	Primera
Fonética	Raíz del infinitivo	/kant/ (010...110)
	Raíz de la forma conjugada	/kant/ (010...110)
	Sufijo de la forma conjugada	/o/ (000...010)

La tabla 3.14 muestra la distribución de frecuencias en el vocabulario de entrada. Como ya se ha comentado, el número de verbos regulares en inglés es mucho mayor que el de los verbos irregulares. Sin embargo, la frecuencia de uso de cada una de las formas irregulares es mucho mayor que la de las regulares. Es decir, a pesar de que existen muchos más verbos regulares que irregulares, las distintas formas de los verbos irregulares son mucho más usadas que las de los verbos regulares. Como puede verse en la tabla, el vocabulario utilizado recoge perfectamente esta característica general del inglés. A pesar de que en nuestro vocabulario existen 389 verbos regulares y tan sólo 89 irregulares, la frecuencia de uso de estos últimos es muy superior. De hecho, la frecuencia de uso promedio de cada uno de los verbos irregulares es 986.61 mientras que la de los regulares es tan sólo de 71.30. La lista completa de formas verbales y sus frecuencias de uso pueden verse en el apéndice C.

Tabla 3.14: Distribución de regularidad y frecuencia en el vocabulario de entrada inglés.

Regularidad	Número de verbos	Frecuencia de sus formas	Tasa frecuencia/verbos
Irregular	89	87808	986.61
Regular	389	27736	71.30

Castellano En el caso del castellano, el vocabulario usado como entrada para el modelo consiste en el conjunto de formas verbales contenido en el Inventario Verbal del Castellano (Spanish Verb Inventory⁴ - SVI, [Rivera et al., 2009]). El SVI está formado por los 50 primeros verbos adquiridos normalmente por los niños. Contiene formas verbales conjugadas en distintas personas, número y en 4 tiempos verbales: presente, futuro, pretérito imperfecto y pretérito perfecto simple. Las formas de futuro fueron descartadas por su baja

⁴Accesible en <http://cr1.ucsd.edu/experiments/svi/>

frecuencia de uso en el vocabulario infantil, así como las formas del pretérito imperfecto porque apenas presentan una sola forma irregular. Además, dos formas verbales fueron descartadas por ser muy probable que sus frecuencias de uso asociadas fuesen erróneas: la forma verbal *como* y la forma verbal *nada*. Ambas tienen una altísima frecuencia en el SVI comparadas con otras formas y, curiosamente, son homógrafas con un adverbio y un pronombre muy frecuentes en castellano. Este hecho hace suponer que a la hora de calcular las frecuencias de uso se contaron como formas verbales, dicho adverbio y dicho pronombre. Por tanto, se eliminaron estas dos formas del vocabulario. De este modo, el vocabulario de entrada consiste en 220 formas de pretérito perfecto simple y 248 formas del presente simple. A la hora de juzgar la irregularidad de los lexemas y sufijos, se tuvo en cuenta sólo las características fonológicas y no la representación ortográfica de las palabras. Por ejemplo, se consideró que el lexema de la forma verbal *saqué* es regular a pesar de que el lexema del infinitivo y el de esta forma no coinciden (*sac-* y *saq-* respectivamente). Sin embargo, en términos fonológicos, ambos lexemas son idénticos. El cambio en la consonante del lexema responde simplemente a factores ortográficos que, obviamente, el niño desconoce. La lista completa de formas verbales y sus frecuencias de uso pueden verse en el apéndice C.

Tabla 3.15: Distribución de regularidad y frecuencia por tiempos en el SVI.

Tiempo	Regularidad	Número de verbos	Frecuencia de sus formas	Tasa frecuencia/verbos
Pasado	Regular	166	60114	362.13
	Irregular	54	100323	1857.83
Presente	Regular	199	117651	591.21
	Irregular	49	131520	2684.08

La tabla 3.15 muestra la distribución de las formas verbales y frecuencias dependiendo del tiempo verbal y la regularidad. Como puede verse, existen muchos más verbos regulares tanto en presente como en pasado. Sin embargo, las frecuencias de uso de las formas irregulares son mayores que las de las formas regulares. A primera vista, la distribución es similar a la del inglés. Sin embargo, existen algunas diferencias que, como se verá más adelante, son claves a la hora de explicar cómo estos dos lenguajes tan diferentes pueden ser adquiridos usando los mismos mecanismos cognitivos. En primer lugar, a pesar de que las formas irregulares en castellano tienen frecuencias de uso mayores que las regulares, la diferencia no es tan pronunciada como en el caso del inglés. En segundo lugar, las irregularidades no siguen una distribución uniforme en las distintas combinaciones de conjugación, modo, tiempo, aspecto, número y persona. Existen algunas de esas combinaciones que presentan únicamente formas regulares. Por ejemplo, en el SVI, las formas

de tercera persona del singular del pretérito perfecto simple de la primera conjugación son todas regulares salvo una (que es la más frecuente). Y algunas de las combinaciones presentan principalmente formas irregulares. Por ejemplo, en el SVI, las formas de primera persona del singular del presente simple de los verbos de la tercera conjugación son todas irregulares salvo una.

Es también importante remarcar la diferente distribución de frecuencias entre las formas de presente y de pasado. Como se ha comentado, las formas regulares se concentran en algunos tiempos y conjugaciones. En particular, el presente simple en castellano se caracteriza por su alta regularidad: la mayor parte de las formas son regulares, pero las pocas formas irregulares tienen una elevada frecuencia de uso. Además, la mayoría de las formas irregulares son formas diptongadas, que no han sido incluidas en el análisis de la sobrerregularización (siguiendo el enfoque de Clahsen et al. [2002]). Como se verá más adelante, este hecho explica las diferencias en la adquisición de las formas verbales de presente y pasado.

3.2.4. Procedimiento

Para simular el proceso de adquisición de la morfología verbal tanto en castellano como en inglés se ha seguido el diseño experimental de Taatgen y Anderson [2002]. Cada 2000 segundos simulados por ACT-R, el modelo “escucha” dos formas verbales y se le pide que produzca una. El escuchar supone introducir directamente en la memoria declarativa dos nuevas formas verbales. Cada una de las formas verbales escuchadas y producidas se selecciona de forma aleatoria atendiendo a la distribución de frecuencias dada en el vocabulario. Por último, también siguiendo el diseño de Taatgen y Anderson [2002], se consideró un mes de simulación cada 1300 formas verbales producidas. Este número se eligió de una forma un tanto arbitraria pero los resultados del modelo no dependen del número exacto de formas verbales producidas puesto que en todos los casos se estudian las tasas de producción de los distintos tipos de errores y no sus valores absolutos.

Implementación y validación del modelo de adquisición de la morfología verbal

Paréceme, joh Anselmo!, que tienes tú ahora el ingenio como el que siempre tienen los moros, a los [...] que les han de traer ejemplos palpables, fáciles, intelegibles, demonstrativos, indubitables.

Miguel de Cervantes,
El ingenioso hidalgo Don Quijote de la Mancha.

El estudio de la adquisición de la morfología verbal en esta tesis se basa en el modelo computacional cognitivo presentado en este capítulo. El objetivo del modelo es tratar de describir los procesos y estructuras involucrados en la adquisición de la morfología verbal en dos idiomas muy diferentes: el inglés y el castellano. Ese objetivo ha de ser alcanzado tratando de mantener la plausibilidad psicológica del modelo por dos razones fundamentales. En primer lugar, los propios mecanismos y estructuras del modelo pueden servir para comprobar, matizar e incluso proponer nuevas hipótesis acerca de los mecanismos que subyacen a la adquisición y procesamiento del lenguaje. En segundo lugar, pensando en la segunda parte de este trabajo de tesis, resulta obvio que cuanto mayor sea la plausibilidad psicológica del modelo, mayor será la utilidad práctica de la información extraída a través del modelado. En este capítulo se describen los detalles de implementación del modelo, analizando las simplificaciones realizadas y las características de cada uno de sus elementos, y se dan ejemplos concretos de su dinámica. A continuación, las secciones 4.2 y 4.3 muestran los resultados obtenidos en los experimentos de adquisición de la morfología verbal inglesa y castellana respectivamente, comparándolos con los comportamientos observados empíricamente y comentados en el capítulo anterior. Por último, la sección 4.4 resume y analiza los resultados obtenidos y comenta las conclusiones que se pueden extraer de ellos.

4.1. Modelo de adquisición de la morfología verbal

El modelo computacional cognitivo que se presenta en esta sección está basado en el modelo Declarativo/Procedural comentado en la sección 2.3.1. El modelo parte de las ideas de Ullman [2004] y Pinker [1994, 1999] e incorpora algunas de las ideas de propuestas más recientes como el enfoque de *múltiples reglas* [Albright y Hayes, 2003; Taatgen y Dijkstra, 2003]. Este enfoque propone la necesidad de la adquisición de reglas fonológicas para la flexión de verbos irregulares. Como se ha visto, los verbos irregulares forman grupos de similitud fonológica y los patrones de estos grupos son aplicados en ocasiones tanto a verbos existentes (*bring* - *brang**) como a nuevos verbos (*spling* - *splang**). De ahí que el modelo propuesto permita cierto grado de generalización no sólo a nivel morfológico sino también fonológico.

En esta sección se comentan los detalles de diseño e implementación del modelo presentado en este trabajo de tesis. En primer lugar se resumen las suposiciones y simplificaciones para posteriormente pasar a detallar cada uno de los componentes del modelo así como su funcionamiento general.

4.1.1. Suposiciones de partida

Toda tarea de modelado requiere de una serie de suposiciones y simplificaciones iniciales. Un modelo no es más que una representación de un sistema complejo cuyo comportamiento es difícil estudiar directamente. Para facilitar ese estudio, el modelo ha de recoger los aspectos fundamentales del sistema estudiado y ha de simplificar aquellos aspectos que resultan superficiales o que presentan una elevada complejidad para ser modelados. Más aún, cuando se trata de modelar una tarea en la que interactúan una gran cantidad de procesos y estructuras como en el caso de la adquisición y procesamiento de la morfología verbal, la introducción de ciertas simplificaciones teóricas en el modelo se hace necesaria para garantizar su viabilidad. Así pues, el modelo presentado parte de dos supuestos o simplificaciones fundamentales que es importante tener en cuenta:

Se asume que los sistemas que proporcionan los distintos tipos de información están plenamente desarrollados cuando comienza el proceso de adquisición de la morfología verbal. A nivel fonológico, esto implica que tanto el sistema perceptual que capta las representaciones fonológicas como las propias representaciones de los fonemas son totalmente conocidas antes de comenzar el aprendizaje. A nivel léxico-semántico, se asume que el niño posee representaciones adecuadas del significado de los distintos verbos y es capaz de

distinguirlos a partir de las representaciones fonéticas captadas por el sistema perceptual. A nivel gramatical, se asume que el niño conoce las distintas características gramaticales usadas por el modelo y es capaz de distinguirlas a partir de las representaciones fonéticas. El único esfuerzo por modelar las dificultades que presentan los niños en la percepción y extracción de la información morfológica y fonológica consiste en la introducción de un factor de ruido en ambos procesos (que se explica en la próxima sección).

Además, se supone que el niño es capaz de reconocer patrones en las representaciones fonéticas que percibe (y en las representaciones morfológicas que se derivan de ellas). Es decir, se admite que al oír el pasado del verbo *sing*, es decir *sang*, el niño es capaz de reconocer que hay un cambio del fonema vocálico.

A pesar de estas simplificaciones, el modelo ha tratado de evitar otras típicamente utilizadas dado que su plausibilidad psicológica no está demostrada. Por ejemplo, en ningún caso se presuponen correcciones externas (que, como se ha visto en el capítulo 2, no existen en la mayoría de los casos). Como se ha comentado, la mayoría de modelos conexionistas utilizan una señal de retroalimentación para corregir los valores de los pesos de las conexiones. Para evitar el problema de la no existencia de correcciones, varios autores justifican esta señal de retroalimentación argumentando que los niños predicen continuamente lo que van a escuchar y calculan la señal de retroalimentación en función de la diferencia entre su forma predicha y la forma escuchada. Sin embargo, la plausibilidad psicológica de este supuesto no está demostrada.

4.1.2. Percepción

En principio el modelo presentado presupone que los niños tienen la capacidad de percibir y reconocer perfectamente las características gramaticales y fonológicas de las formas verbales que escuchan. Sin embargo, esos procesos de percepción y reconocimiento de las distintas características de las formas verbales se desarrollan en paralelo con la adquisición del lenguaje. En muchas ocasiones, los niños cometen errores de percepción y de interpretación. Y estos errores disminuyen a lo largo del proceso de desarrollo. Con el objetivo de modelar estos errores se introdujo un factor de ruido que decae con el tiempo.

Para ello, se realizaron variaciones aleatorias sobre el vocabulario de entrada usado en cada experimento. Estas variaciones están controladas por la tasa de ruido γ . Este parámetro indica el porcentaje de formas que contendrán algún tipo de variación en cada

uno de los meses de simulación. Los niños mejoran gradualmente su capacidad de reconocer características fonológicas y morfológicas. Por tanto, el valor de este parámetro no es fijo sino que se calcula en cada iteración del modelo como muestra la siguiente ecuación:

$$\gamma = \gamma_0 \cdot e^{-t/26000} \quad (4.1)$$

donde γ_0 es el valor inicial del parámetro de ruido y t es el número de formas verbales producidas por el modelo. Esta fórmula es una aproximación del proceso de desarrollo de las características morfológicas observado en los niños. Distintos autores apuntan que dichas características terminan por establecerse en el periodo comprendido entre el primer y el segundo año tras el comienzo del habla [Gathercole et al., 1999; Grinstead, 2000; Gathercole et al., 2002]. En el modelo presentado, cada mes simulado comprende la producción de 1300 formas verbales. Por tanto, la constante 26000 es usada para hacer que el ruido se haga casi inexistente entre los 12 y los 24 meses simulados.

La componente de ruido descrita se introdujo en los procesos de percepción e interpretación tanto a nivel morfológico como fonético. Los fallos de percepción se simulaban mediante la eliminación de una de las características de la forma verbal escuchada. A nivel morfológico esto implica dejar vacía una de las características gramaticales del *chunk* percibido (por ejemplo la característica de número y persona) y a nivel fonológico esto implica eliminar un fonema (es decir, representarlo por una cadena de ceros). Los fallos de interpretación se simulaban sustituyendo el valor real de una de las características de la forma verbal por otro de los posibles valores. A nivel morfológico esto implica, por ejemplo, sustituir el valor de *presente* por el valor de *pasado* en la característica de tiempo. A nivel fonológico implica la sustitución de un fonema por otro. Durante la simulación, se seleccionan aleatoriamente las formas verbales en las que se introduce ruido de modo que en cada mes simulado, la tasa de formas “ruidosas” fuera la indicada por el parámetro γ . Para cada una de estas formas, se seleccionó aleatoriamente cuáles de sus características debían contener ruido y para cada una de ellas se eligió el tipo de ruido a introducir (la mitad de las características “ruidosas” fueron mal percibidas y la otra mitad malinterpretadas).

Ciertamente es difícil simular adecuadamente el ruido real existente en estos procesos de percepción e interpretación dado que no existe ninguna medida empírica sobre ellos. Sin embargo, esta aproximación mide en cierto modo las dificultades que plantean estos dos procesos durante su etapa de desarrollo.

4.1.3. Memoria declarativa

4.1.3.1. Chunks

Como se ha comentado en la sección anterior, los *chunks* del modelo se definen como se muestra en la figura 4.1. El *chunk* es de tipo *Verb-form*. En este caso esto es un simple formalismo puesto que el modelo trata tan sólo con este tipo de *chunks*. En un modelo más complejo, este campo permitiría distinguir los distintos tipos de *chunks* utilizados. El resto de campos almacenan la información que se ha comentado en la sección 3.2.2. La información léxico-semántica se almacena de forma localizada con un código diferente para cada uno de los verbos del vocabulario. La información gramatical se almacena en los campos *Conjugation*, *Inf.-Stem*, *MTA* (Modo, Tiempo, Aspecto) y *NP* (Número y Persona)¹. De nuevo esta información se almacena usando un esquema localizado, con un código distinto para cada uno de los posibles valores. Como se ha comentado en la sección anterior, el modelo presupone que el niño es capaz de extraer esta información sin problemas en el momento en que comienza a adquirir la morfología verbal. Por último, el campo *Phonology* almacena la representación fonológica del infinitivo usando el esquema comentado en la sección 3.2.2 y el campo *Change* almacena el patrón de cambio fonológico entre el lexema del infinitivo y el de la forma conjugada. Los dos últimos campos almacenan el lexema y el sufijo de la forma conjugada. Obviamente, cuando el *chunk* representa la forma verbal a conjugar, estos dos últimos campos están vacíos y el objetivo del modelo es rellenarlos.

Verb-form	
Lex.-Sem.	decir
Conjugation	3
Inf.-Stem	dec-
MTA	pres
NP	S3
Phonology	/dec-/
Change	/e/ → /i/
STEM	dic-
SUFFIX	-e

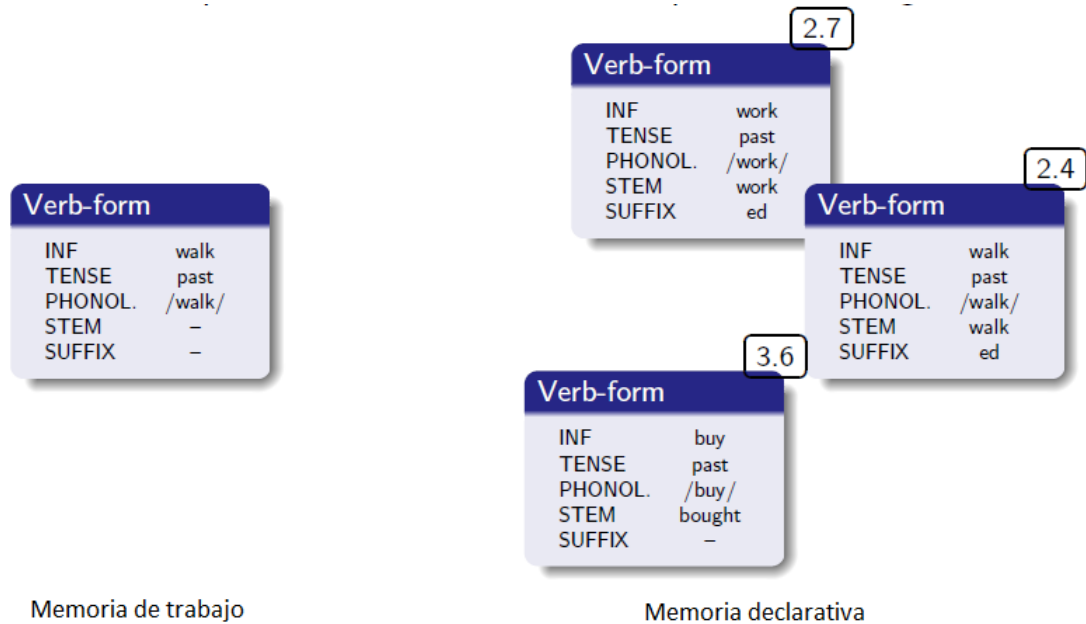
Figura 4.1: Ejemplo de *chunk* utilizado por el modelo.

¹En inglés, las características que no son utilizadas simplemente son obviadas por el modelo.

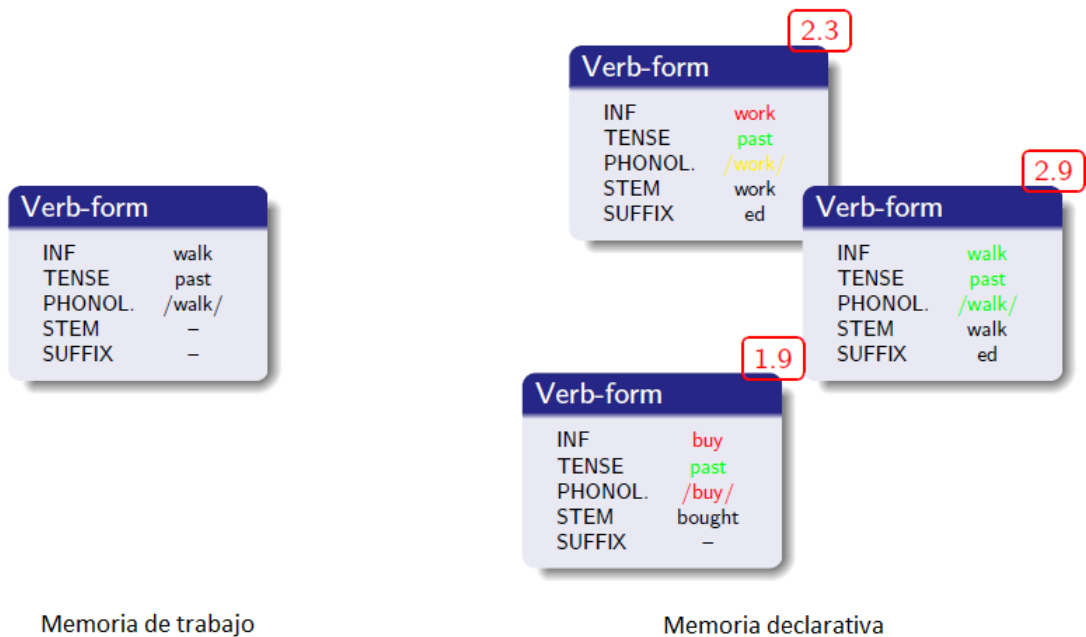
4.1.3.2. Recuerdo

Los mecanismos de recuerdo del modelo tienen en cuenta la influencia del contexto y el carácter ruidoso propios de los mecanismos de recuerdo en el ser humano. Es habitual que se produzcan pequeños errores y discordancias al recordar. Como se ha comentado en la sección 3.2.1.1, la activación de los *chunks* almacenados en memoria tiene un componente de largo plazo y otro de corto plazo. El primero está basado en las referencias que se han hecho previamente a ese *chunk*. El segundo componente se basa en la relación con el contexto de trabajo en el momento en que se está conjugando el verbo. Este componente se divide a su vez en otros dos elementos: la activación contextual y la activación por similitud, que son implementados en este trabajo mediante los mecanismos de *Spreading activation* y *Partial matching* [Anderson, 1983]. El mecanismo de *Spreading activation* asume que la memoria tiene estructura de red en la que los nodos están conectados porque comparten características comunes. Por tanto, al intentar recordar un *chunk* con una serie de características, cierta activación se propaga a todos los *chunks* conectados. Es decir, a todos los *chunks* que comparten esas características. Así, la *Spreading activation* refleja cómo la memoria de trabajo condiciona el resultado del recuerdo de la memoria declarativa. La activación por similitud permite al modelo recuperar de la memoria declarativa *chunks* cuyas características no son exactamente iguales a las del *chunk* buscado. Existe una medida de similitud (controlada por los parámetros de sensibilidad comentados anteriormente) que penaliza cada una de las diferencias entre los *chunks* de la memoria declarativa y el *chunk* buscado.

Para entender mejor estos dos mecanismos se puede ver el ejemplo mostrado en la figura 4.2. La figura 4.2(a) muestra el estado de la memoria de trabajo y de la memoria declarativa antes de tratar de recordar el *chunk* buscado. La memoria de trabajo contiene la forma verbal que se desea conjugar: el pasado del verbo *walk*. La memoria declarativa contiene tres *chunks* correspondientes a tres formas verbales previamente escuchadas. Cada uno de estos *chunks* tiene una activación asociada: la activación a largo plazo. Cuando se inicia una búsqueda en la memoria declarativa, los valores de activación son modulados por los procesos de *Spreading activation* y *Partial matching* (además del ruido que, en este ejemplo, se supondrá que es igual a cero para todas las formas). En la figura 4.2(b) se puede ver los resultados de esa modulación. El primer *chunk*, correspondiente a la forma verbal *worked* recibe parte de la activación propagada por la característica *past* de la forma buscada pero ve disminuida su activación puesto que su información léxico semántica es muy distinta a la del *chunk* buscado y su fonología es medianamente distinta. El segundo *chunk* no ve disminuida su activación puesto que ninguna de sus características difiere



(a) Activaciones a largo plazo en la memoria declarativa



(b) Activaciones modulados por la memoria de trabajo

Figura 4.2: Proceso de recuerdo. Modulaci3n de las activaciones a largo plazo por la memoria de trabajo.

de las de la forma buscada. Más aún, su activación es aumentada puesto que recibe la activación propagada por compartir todas sus características con la forma buscada. Por último, la tercera forma es la que más ve decaer su activación. La característica de tiempo verbal coincide con la buscada y, por tanto, recibe parte de la activación propagada. Sin embargo, sus características léxico-semánticas y fonológicas son muy distintas a las buscadas y, por tanto, su activación se reduce drásticamente. Así, en este escenario, el *chunk* devuelto por la memoria declarativa es el que se estaba buscando a pesar de no ser el *chunk* con la mayor activación a largo plazo.

Estos mecanismos permiten al modelo imitar algunos de los errores que cometen los niños. Por ejemplo, como se ha comentado en la sección 3.1.4, los niños a veces (principalmente en las primeras etapas de su desarrollo) sobreaplican sufijos de la primera conjugación a verbos que pertenecen a la segunda o tercera. Incluso a veces producen formas con errores de tiempo o de número y persona. Estos errores parecen estar relacionados con ciertos desajustes en el reconocimiento de las características gramaticales en el proceso de recuerdo. Del mismo modo, en inglés, Marcus et al. [1992] comprobaron que los niños a veces fallan a la hora de reconocer la característica de pasado durante el proceso de recuerdo. Este hecho lleva a la producción de los errores de doble marca (*broked**) ya comentados. Estos errores muestran de nuevo el carácter ruidoso e impreciso de los mecanismos de recuerdo.

4.1.4. Memoria procedural

4.1.4.1. Reglas

El modelo se basa en dos estrategias generales relacionadas no sólo con el lenguaje sino con la cognición en general: recuerdo y analogía.

- Recuerdo: esta estrategia consiste simplemente en buscar un elemento en concreto en la memoria declarativa.
- Analogía: esta estrategia trata de construir la forma verbal deseada a partir de un patrón encontrado previamente en una forma similar almacenada en la memoria declarativa.

Es importante resaltar que este conocimiento inicial que se le presupone al modelo no son más que dos mecanismos cognitivos muy generales. Estas estrategias iniciales fueron ya propuestas y utilizadas en los trabajos de MacWhinney [1978] y Taatgen y Anderson [2002]. Sin embargo, el uso que hace el modelo de estas estrategias difiere significativamente

del uso que proponen estos autores. El modelo presentado tiene en cuenta la hipótesis de que los procesos de formación del lexema y sufijación están, de algún modo, disociados, no sólo en los sistemas verbales altamente flexionados sino también en los sistemas flexivos más pobres como el del Inglés (como sugieren errores de doble marca como *broked**).

Además de los *chunks* de la memoria declarativa, el otro componente principal de ACT-R son las reglas de producción. Estas reglas permiten implementar las dos estrategias que suponen el núcleo del modelo. Dada la disociación entre los procesos de formación del lexema y los procesos de sufijación que parecen mostrar los datos empíricos, la estrategia de analogía se divide en dos partes (*analogía de lexema* y *analogía de sufijo*) con el objetivo de producir el lexema y el sufijo de forma separada. Además, dados los errores fonéticos comentados, la analogía de lexema puede ser a nivel morfológico o a nivel fonético. Es decir, se puede construir el lexema de la nueva forma verbal a partir de un patrón morfológico o a partir de un patrón fonético previamente adquirido. Por tanto, el esquema que define el flujo de trabajo del modelo sería el mostrado en la figura 4.3. Las ramas etiquetadas como PM(Partial Matching) se utilizan cuando se recuerda una forma que no es exactamente igual a la forma buscada sino que difiere en alguna de sus características. Estas ramas reflejan por tanto la incapacidad ocasional de reconocer determinadas características gramaticales que se ha podido observar en los niños. Esta incapacidad permite al modelo producir algunos tipos de errores como los errores de doble marca en inglés o los errores de sobreaplicación de sufijos de la primera conjugación en castellano que, a pesar de ser bien conocidos, han sido pasados por alto por la mayoría de los modelos existentes.

- **Recuerdo:** cuando el modelo trata de encontrar una forma verbal de un determinado verbo, esta regla simplemente busca el *chunk* correspondiente en la memoria declarativa. La regla tiene éxito si esa forma verbal está en la memoria con una activación mayor que el resto de formas² y mayor que el umbral de recuerdo. En ese caso, el modelo produce la forma que quería sin ni siquiera intentar aplicar la analogía.

Si el recuerdo falla, la analogía entra en juego. Tanto la analogía morfológica como la analogía fonética están implementadas como un simple reconocedor de patrones. Las estrategias de analogía consisten en una regla que busca un cierto *chunk* en memoria y una segunda regla que trata de encontrar un patrón en el *chunk* devuelto. Los procesos de recuerdo dependen de la similitud entre el *chunk* buscado y los *chunks* en memoria. De este modo, si no se recuerda la forma exacta, lo más probable es que se devuelva una forma parecida (bien morfológica o fonológicamente). A partir de la forma recuperada de la memoria, el modelo trata de aplicar alguno de los dos tipos de analogía dependiendo

²En la sección 3.2.1.1 puede verse cómo se calcula la activación de cada uno de los *chunks*

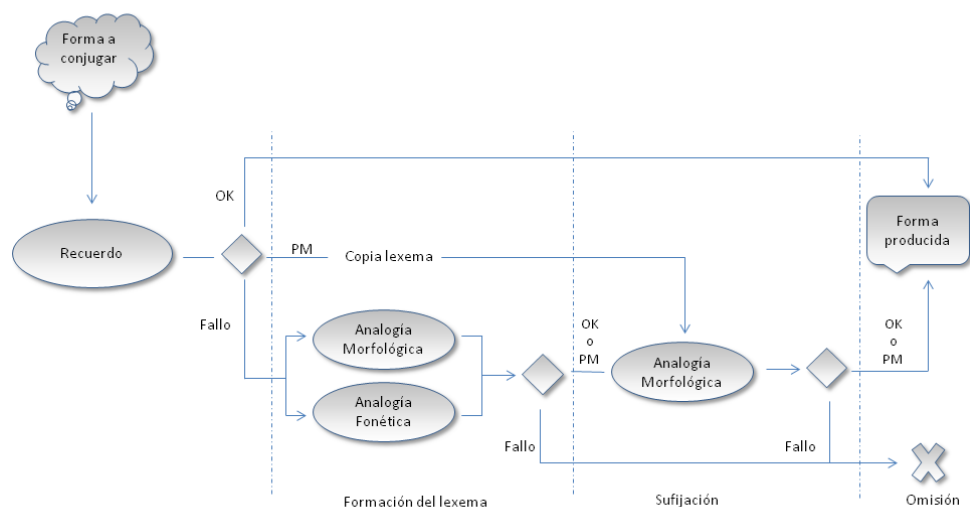


Figura 4.3: Mecanismos usados por el modelo.

del patrón que pueda detectar (en caso de que pueda detectarlo). Así pues, a la hora de aplicar la analogía para generar el lexema de la forma flexionada, se pueden dar dos casos dependiendo del *chunk* recuperado:

- **Analogía morfológica:** Esta estrategia trata de encontrar un patrón morfológico en el *chunk* devuelto por la memoria declarativa. Tanto en el caso del inglés como en el del castellano, el único patrón distinguible a nivel morfológico es que el lexema del infinitivo y de la forma conjugada se repitan. Por tanto, si los campos *Infinitive-Stem* y *Stem* de la forma recuperada coinciden, esta regla copia el campo *Infinitive-Stem* de la forma objetivo en el campo *Stem* de esta misma forma.
- **Analogía fonológica:** Esta estrategia trata de encontrar un patrón fonológico en el *chunk* devuelto por la memoria declarativa. En este caso, los patrones que se pueden encontrar son muchos y distintos en los casos del inglés y el castellano. Por ejemplo en inglés se tiene *cambio de vocal* (*sing* - *sang*, *swim* - *swam*) o en castellano *añadir el fonema /g/* (*venir* - *vengo*, *poner* - *pongo*). Esta regla busca uno de estos patrones en el *chunk* recuperado y trata de aplicarlo (si es posible) a la forma objetivo.

La última de las estrategias del modelo es la analogía de sufijo. En este caso, el modelo sólo busca patrones morfológicos puesto que en ningún caso se ha observado que los niños produzcan errores fonéticos en el sufijo. Por tanto, la analogía de sufijo es muy similar a la analogía morfológica para el lexema:

- Analogía de sufijo: Si los campos *Infinitive-Stem* y *Stem* de la forma recuperada coinciden, esta regla copia el campo *Suffix* de la forma recuperada de la memoria en el campo *Suffix* de la forma objetivo.

4.1.4.2. Aprendizaje procedural

El aprendizaje en ACT-R se da a través de dos mecanismos: la compilación de reglas y el refuerzo de la utilidad. La compilación de reglas es un tipo de generalización que consiste en generar una nueva regla a partir de dos reglas que se ejecutan una tras de otra. En el modelo presentado, este proceso se da en dos puntos. En primer lugar, como se ha comentado, las estrategias de analogía consisten en una regla que busca un cierto *chunk* en memoria y una segunda regla que trata de encontrar un patrón en el *chunk* devuelto. Esas dos reglas pueden ser integradas en una única regla que generaliza el resultado de las dos reglas aplicadas. Por ejemplo, al aplicar la analogía morfológica, si la primera regla devuelve un *chunk* a partir del cual la segunda regla puede encontrar un patrón morfológico (copiar el lexema), entonces el modelo es capaz de generalizar ese caso y componer una regla que copia el lexema directamente sin necesidad de buscar ningún ejemplo en memoria. El otro punto en el que se da la compilación es entre las analogías de lexema y de sufijo para dar lugar a una regla regular que produce la forma verbal completa. Estas reglas recién creadas tienen una utilidad muy baja de modo que, inicialmente, son usadas en muy pocas ocasiones. Para que estas reglas lleguen a utilizarse, su utilidad ha de ser reforzada.

El refuerzo de la utilidad de las reglas se lleva a cabo de dos formas. Cada vez que una regla es recompilada, su utilidad se incrementa en un determinado factor que depende de la tasa de aprendizaje (parámetro α). De este modo, para que una regla aprendida comience a ser utilizada, ha de ser recompilada en numerosas ocasiones para que su utilidad pueda competir con la de las reglas ya existentes. La otra forma de refuerzo de la utilidad es a través del llamado aprendizaje de la utilidad (*utility learning* en la terminología de ACT-R), que está basado en recompensas. Cada vez que el modelo flexiona una forma verbal se produce una recompensa interna que se propaga a todas las reglas que se han ejecutado durante la producción de dicha forma. De este modo, la utilidad de cada regla se va aproximando de forma gradual al valor medio de las recompensas que recibe. Esta propagación es sensible al tiempo, es decir, las reglas que consiguen producir una forma verbal más rápidamente reciben una mayor recompensa. Es importante resaltar que estas recompensas no representan ningún tipo de corrección o refuerzo desde el exterior. Como se vio en la sección 2.2, los niños apenas reciben correcciones por parte de los adultos. Por tanto, este modelo no usa ningún tipo de retroalimentación proveniente del exterior.

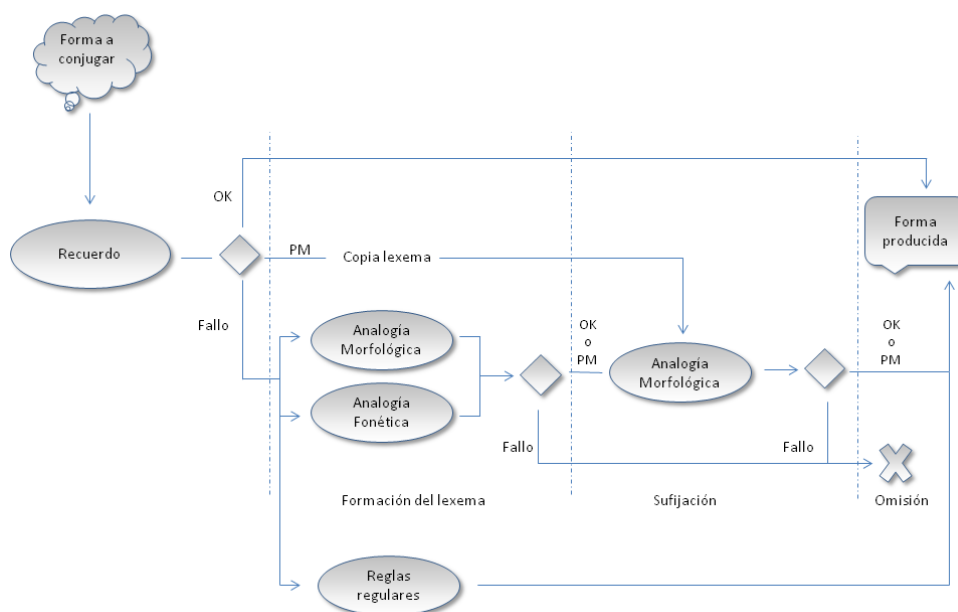


Figura 4.4: Mecanismos usados por el modelo tras haber aprendido las reglas regulares.

Las recompensas se producen cada vez que el modelo trata de conjugar una forma verbal. Si consigue producir una forma, la recompensa tiene un valor mayor que si no consigue producirla. Pero estos valores son idénticos si el niño produce la forma correcta o no, dado que él no puede saberlo. Lo único que puede saber es si ha conseguido flexionarla o no y de ahí que ese sea el único conocimiento que se tiene en cuenta a la hora de calcular las recompensas.

De este modo, una vez que el modelo ha adquirido las reglas regulares, su esquema sería el mostrado en la figura 4.4. Las reglas regulares compiten con la analogía al producirse un fallo en el recuerdo. En principio, la utilidad de las reglas regulares es muy baja y apenas son utilizadas. Pero cada vez que el modelo encuentra un nuevo ejemplo que le permite generalizar la regla regular (es decir, recompilarla), su utilidad es aumentada. Una vez que las reglas regulares se han compilado un número suficiente de veces, comienzan a ser utilizadas y, dado que son capaces de conjugar una determinada forma más rápidamente, su refuerzo es mayor que el de la analogía. Las reglas regulares terminan por imponerse a la analogía y, en las etapas finales de desarrollo, ésta apenas se utiliza.

4.1.5. Parámetros del modelo

Los mecanismos del modelo están controlados por una serie de parámetros que modulan su comportamiento. ACT-R tiene gran cantidad de parámetros relacionados con distintos mecanismos. Además, permite añadir ciertos parámetros para controlar funcionalidades propias de cada modelo. Comentar todos ellos está fuera de los objetivos de esta tesis, así que se hablará en detalle de los parámetros más relevantes para el funcionamiento del modelo propuesto. Muchos de ellos han sido ya comentados en la sección 3.2.1.1 y se invita al lector a volver a dicha sección para entender bien su funcionamiento. Estos parámetros pueden dividirse en cuatro grupos:

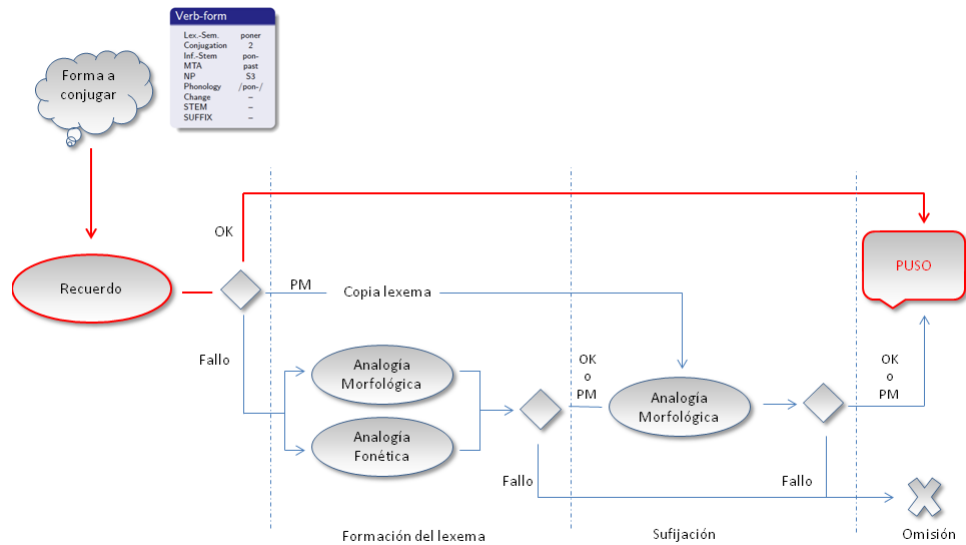
- Memoria declarativa:
 - RT: Es el umbral de recuerdo (en inglés *retrieval threshold*). Marca el límite mínimo de activación para que un *chunk* pueda ser recuperado de la memoria declarativa.
 - ANS: Factor de ruido en la activación. Define el nivel de ruido introducido en el proceso de recuerdo.
 - BLL: Factor de olvido. Controla cuán rápidamente decae la activación de los *chunks* en la memoria declarativa.
- Memoria procedural:
 - α : Tasa de aprendizaje procedural. Controla cuán rápido se aprenden las nuevas reglas y se refuerzan las ya existentes mediante los mecanismos de recompilación y de recompensa.
 - EGS: Factor de ruido en la utilidad. Controla el ruido en el proceso de selección de la regla a ejecutar.
- Procesamiento gramatical:
 - γ_m : Controla el nivel de ruido introducido en el proceso de percepción y extracción de las características gramaticales de las formas percibidas.
 - $\gamma_m - dec$: Controla el declive del ruido morfológico durante el proceso de desarrollo.
 - Sensibilidad a las características gramaticales: Varios parámetros controlan la sensibilidad del modelo a las distintas categorías gramaticales (en castellano: Conj-PM, NP-PM y MTA-PM) al tratar de recordar un verbo. Cuanto más sensible es el modelo a una determinada categoría gramatical, más improbable es que se recuerde un *chunk* con un valor erróneo en dicha categoría.

■ Procesamiento fonológico:

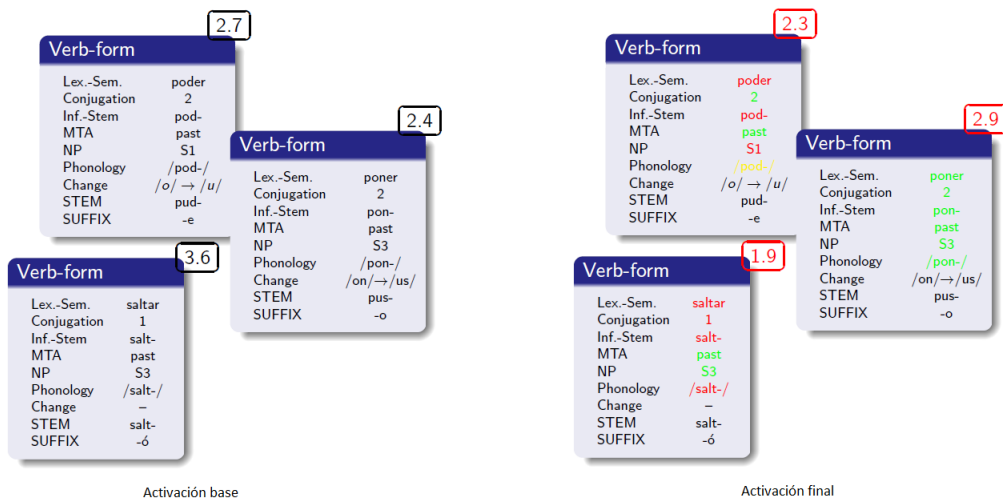
- γ_f : Controla el nivel de ruido introducido en el proceso de percepción y extracción de las características fonéticas de las formas percibidas.
- $\gamma_f - dec$: Controla el declive del ruido fonológico durante el proceso de desarrollo.
- Sensibilidad a las características fonológicas: Controla la sensibilidad fonética del modelo (PHON-PM). Cuanto mayor es esta sensibilidad, menor es la posibilidad de que el modelo recupere de la memoria un *chunk* con una forma fonética distinta a la del *chunk* buscado.

Una vez definidos los parámetros más importantes, se plantea el problema de ajustar sus valores. Una de las mayores críticas de las arquitecturas cognitivas en general y de ACT-R en particular es que, con más de 60 parámetros libres, es posible modelar cualquier comportamiento deseado. Por ejemplo, se podría crear un modelo con memoria infinita otorgando un valor de $-\infty$ al umbral de recuerdo. Pero esto no tendría mucho sentido si se quiere extraer conclusiones fiables acerca de los mecanismos cognitivos involucrados en la tarea modelada. Por tanto, es importante tener en cuenta ciertas limitaciones cognitivas generales a la hora de ajustar los valores de los parámetros. En este sentido, se decidió utilizar valores similares a los que se han utilizado en otros modelos para tareas muy distintas. Con ese objetivo se utilizó una base de datos que recoge los valores medios y desviaciones típicas de los distintos parámetros de ACT-R en más de 40 modelos diferentes [Wong et al., 2010]. Los valores de los parámetros del modelo se ajustaron manualmente partiendo de los valores obtenidos de dicha base de datos. Los valores concretos utilizados finalmente en las simulaciones de inglés y castellano pueden consultarse en el apéndice B junto con los valores promedios recogidos en la base de datos de Wong et al. [2010]. Como puede verse, los valores de todos los parámetros se mantienen muy próximos a los valores medios salvo en el caso del parámetro α , cuyo valor es mucho menor debido a que el modelo se ocupa de un aprendizaje a muy largo plazo, a diferencia de la mayoría de modelos de dicha base de datos. En cuanto a los parámetros que no son específicos de ACT-R sino de este modelo en concreto (parámetros de procesamiento gramatical y procesamiento fonológico), sus valores fueron fijados en base a estudios previos sobre la adquisición de las características gramaticales en castellano [Gathercole et al., 1999; Grinstead, 2000; Gathercole et al., 2002; Montrul, 2004] y adaptados manualmente para adecuarse tanto al castellano como el inglés. De este modo, el modelo presentado minimiza la flexibilidad por la que muchas arquitecturas cognitivas son criticadas y aumenta su plausibilidad psicológica y, por tanto, su valor informativo al tomar en consideración ciertas limitaciones cognitivas generales del ser humano.

4.1.6. Dinámica del modelo



(a) Estrategias usadas por el modelo.



(b) Activaciones a largo plazo y activaciones moduladas por la memoria de trabajo.

Figura 4.5: Dinámica del modelo. Ejemplo 1: producción correcta.

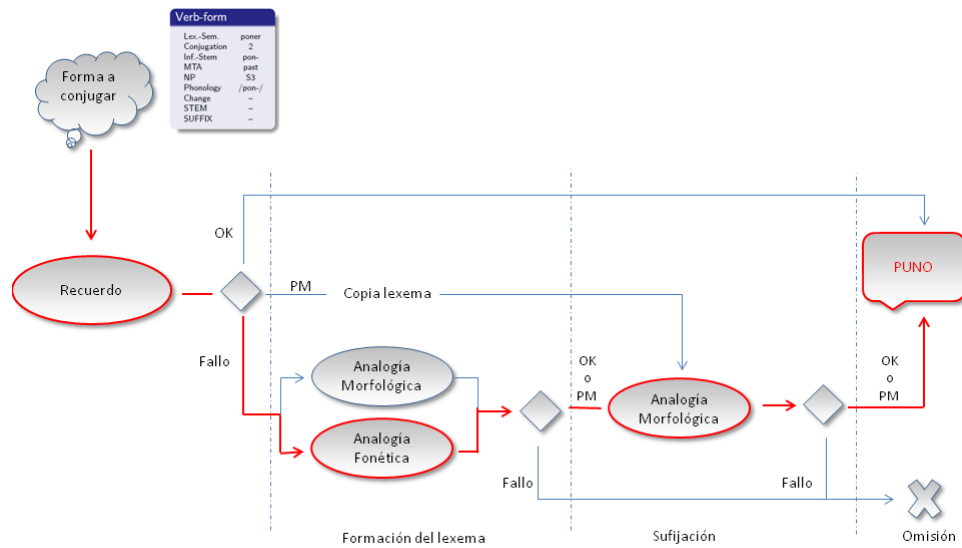
Para entender mejor el funcionamiento del modelo se muestran a continuación unos ejemplos con distintas configuraciones de la memoria declarativa y distintas formas a conjugar. Para cada uno de los ejemplos se comenta como se comportan los dos elementos principales de ACT-R: la memoria declarativa y la memoria procedural. Es decir, se muestran las distintas reglas de producción utilizadas por el modelo así como la evolución de

los valores de activación de los distintos *chunks* de la memoria declarativa. Con el objetivo de simplificar los ejemplos, se supondrá que los valores de ruido en la activación de los *chunks* y la utilidad de las reglas son igual a cero.

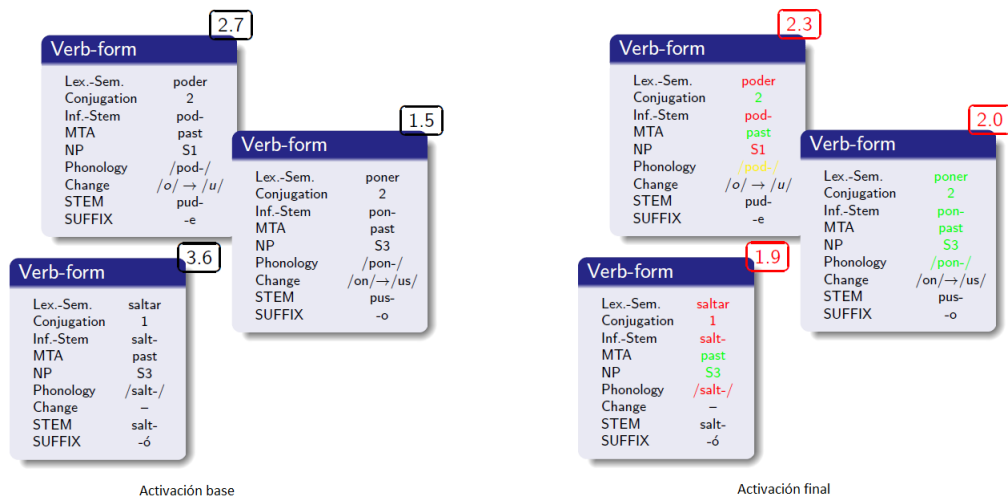
Producción correcta En la figura 4.5 se puede ver el primer ejemplo. El objetivo es conjugar la tercera persona del pasado simple del verbo *poner*. Como se muestra en el diagrama de la figura 4.5(a), la primera estrategia que usa el modelo consiste en tratar de recordar esa forma de la memoria declarativa. Supongamos que la memoria declarativa tiene los *chunks* y activaciones base mostrados en la parte izquierda de la figura 4.5(b). Como se comentó en la sección 4.1.3.2, los mecanismos de *Spreading Activation* y *Partial Matching* modulan los valores de activación a largo plazo para dar lugar a los valores de activación finales que pueden observarse en la parte derecha de la figura 4.5(b). Así, la forma recordada sería *puso*, que es exactamente la forma buscada. Por tanto, el modelo produciría la forma correcta.

Error por analogía fonológica La figura 4.6 muestra la información relativa al segundo ejemplo. El objetivo sigue siendo conjugar la tercera persona del pasado simple del verbo *poner*. El único cambio en la memoria declarativa es que la activación a largo plazo de la forma *puso* es bastante menor que en el caso anterior. Por tanto, a pesar de la modulación realizada por la activación contextual y la activación por similitud, este *chunk* no tendría la mayor activación. En este caso la mayor activación corresponde a la forma *pude*. Esta forma corresponde al verbo *poder*, cuya similitud fonética con el verbo *poner* es evidente. De ahí que su activación no se vea reducida drásticamente y sea la forma devuelta en este caso. Dado que no es la forma que se estaba buscando, el modelo ha de tratar de encontrar algún patrón en ella que pueda aplicar a la forma que quiere flexionar. A nivel morfológico no existe ningún patrón claro. Sin embargo, a nivel fonológico, se puede observar que simplemente se ha cambiado el fonema /o/ del lexema por el fonema /u/. La analogía fonológica es capaz de detectar este patrón y aplicarlo (siempre que sea posible) a la forma que se quiere producir. Por tanto, construye el lexema cambiando el fonema /o/ por el fonema /u/ dando lugar a *pun-*. A continuación el modelo trataría de aplicar la analogía de sufijo recordando una nueva forma verbal y buscando un patrón en ella. Suponiendo que esta analogía funcionase correctamente, el resultado sería la producción de la forma *puno**: uno de los errores por similitud fonética encontrados en los estudios empíricos.

Sobreaplicación de sufijo de la 1ª conjugación La figura 4.7 muestra la información relativa al tercer ejemplo. En este caso, el objetivo es conjugar la tercera persona del singular del pasado simple del verbo *traer*. Supongamos que la analogía consigue obtener



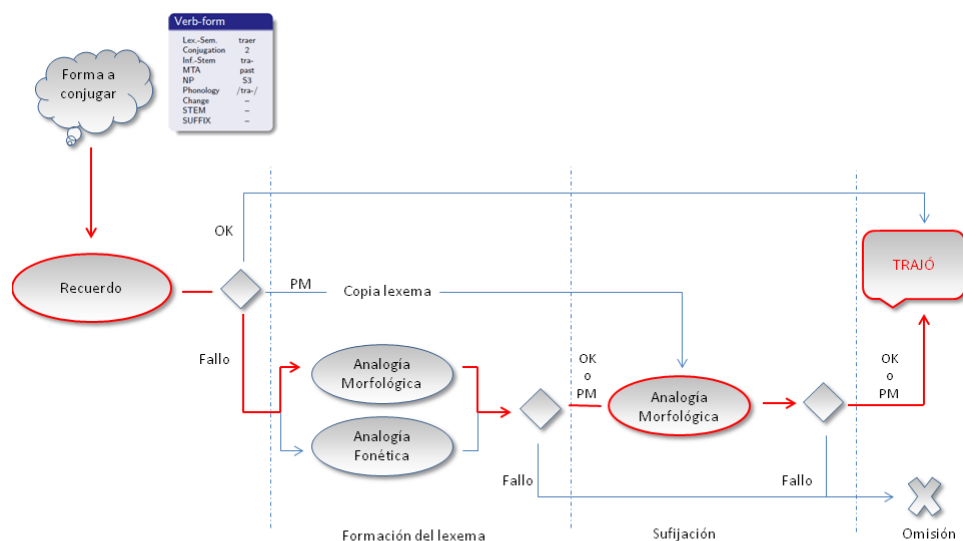
(a) Estrategias usadas por el modelo.



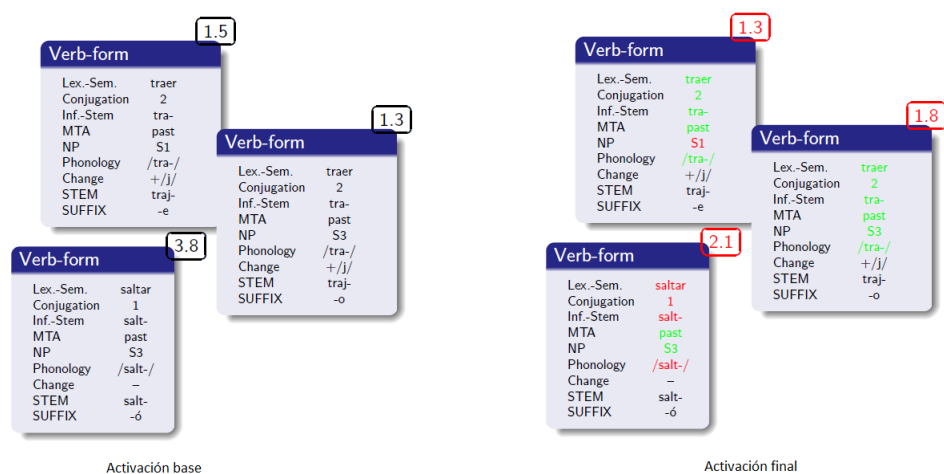
(b) Activaciones a largo plazo y activaciones modulados por la memoria de trabajo.

Figura 4.6: Dinámica del modelo. Ejemplo 2: error por analogía fonológica.

el lexema adecuado *traj-*. A continuación el niño intentaría aplicar la analogía de sufijo. Para ello, busca nuevamente en la memoria una forma verbal. El resultado de esta búsqueda se puede ver en la figura 4.7(b). Dado que la forma *saltó* tiene mucha más activación a largo plazo, es la forma recordada a pesar de que el resto de formas son más similares a la forma buscada. En ese caso, el modelo buscaría un patrón morfológico en la forma devuelta y, al encontrar que se ha copiado el lexema del infinitivo al lexema de la forma



(a) Estrategias usadas por el modelo.



(b) Activaciones a largo plazo y activaciones modulados por la memoria de trabajo.

Figura 4.7: Dinámica del modelo. Ejemplo 3: sobreaplicación de sufijo de la 1ª conjugación.

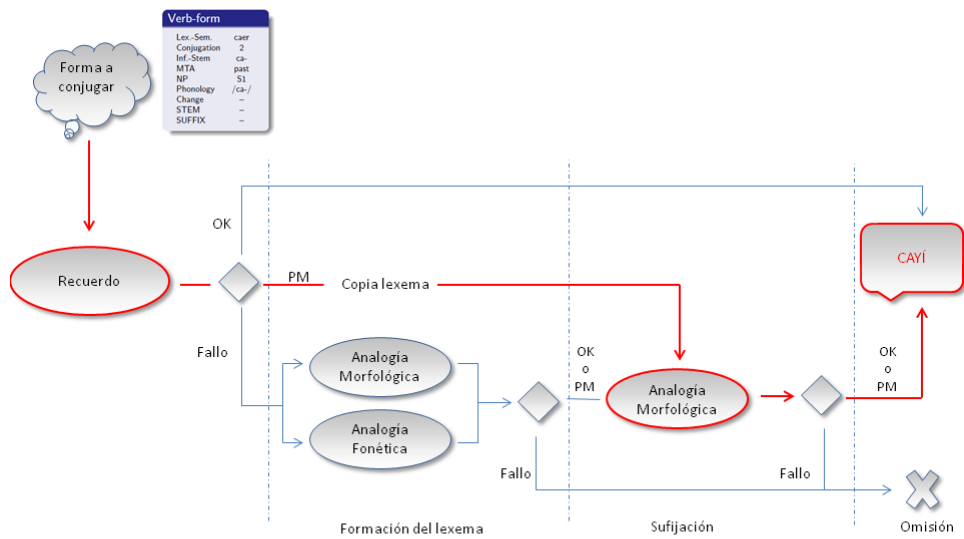
encontrada, copiaría el sufijo de la forma encontrada a la forma que se quiere conjugar. De este modo, el modelo produciría la forma *trajó*, que es otro de los errores encontrados en el estudio de Clahsen et al. [2002].

Cabe mencionar que, en éste último caso, al funcionar la analogía morfológica, el modelo compilaría una regla del tipo:

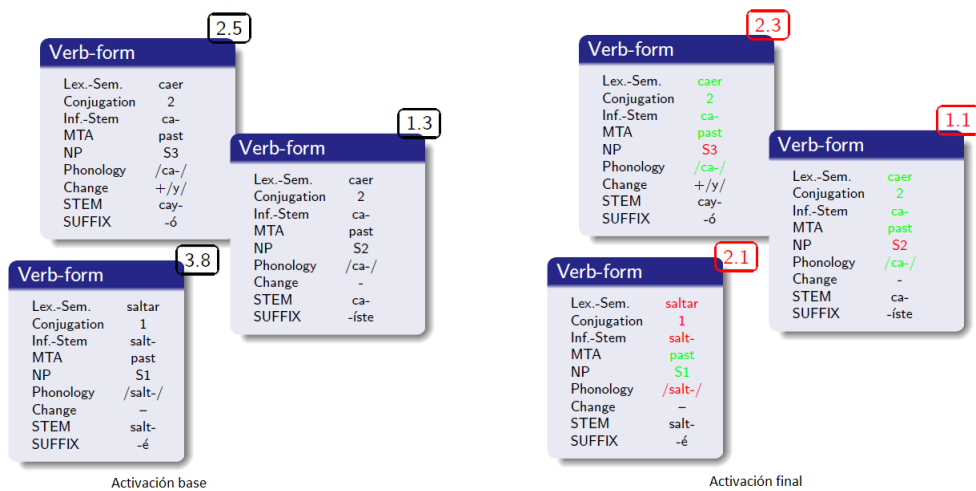
SI el OBJETIVO es	producir el sufijo de una forma con:
	Conjugation: 2
	MTA: past
	NP: S3
ENTONCES	SUFFIX = ó

Obviamente esta regla es errónea, pero ni el niño ni el modelo pueden saberlo, de modo que la regla es compilada. Sin embargo, como ya se ha comentado, la utilidad de una regla recién creada es muy baja y sólo se incrementa cuando la regla es recompilada. Dado que un mismo error no suele darse en muchas ocasiones, la utilidad de las reglas erróneas nunca es suficiente como para que sean utilizadas y por tanto, no se produce el mismo error de forma sistemática. De este modo, como ya se comentó anteriormente, el modelo no asume ningún tipo de recompensa o procesamiento cognitivo especial para las formas o reglas correctas e incorrectas puesto que el niño no puede distinguirlas. Simplemente, las formas y reglas erróneas no llegan a ser suficientemente reforzadas como para usarse sistemáticamente.

Irregularización La figura 4.8 muestra la información relativa al cuarto ejemplo. En este caso, el objetivo es conjugar la primera persona del singular del pasado simple del verbo *caer*. Como siempre, el modelo trata de recordar la forma que desea conjugar. La figura 4.8(b) muestra los valores de activación inicial y final de los *chunks* de la memoria declarativa. En este caso, la forma recordada sería *cayó*, que coincide con la forma buscada salvo en la característica de *número y persona*. En este caso, el modelo usaría la rama etiquetada como *PM* en la figura 4.8(a). Como ya se comentó, esta rama simula la incapacidad que muestran a veces los niños para comprobar ciertas propiedades gramaticales. A continuación, el modelo trataría de aplicar la analogía de sufijo. Suponiendo que lo consiguiera, el resultado sería la producción de la forma *cayí**, uno de los errores de irregularización observados en los niños. Como se señaló anteriormente, este tipo de errores se dan siempre en tiempos verbales en los que al menos una forma es irregular (en este caso *cayó*). Y se producen por la incapacidad del niño de comprobar la característica de número y persona de dicha forma, que es exactamente el mecanismo utilizado por el modelo.



(a) Estrategias usadas por el modelo. Estrategias usadas por el modelo.



(b) Activaciones a largo plazo y activaciones modulados por la memoria de trabajo.

Figura 4.8: Dinámica del modelo. Ejemplo 4: irregularización.

4.2. Experimento 1: Adquisición de la morfología verbal inglesa

El primer experimento realizado consiste en modelar la adquisición de la morfología verbal inglesa. Para ello, se usó el vocabulario y procedimiento comentados en las secciones 3.2.3 y 3.2.4. En las siguientes subsecciones se analizan los resultados del modelo en relación a cada uno de los fenómenos empíricos comentados en la sección 3.1.2 y se comparan esos resultados con los obtenidos por los niños.

4.2.1. Aprendizaje en forma de U

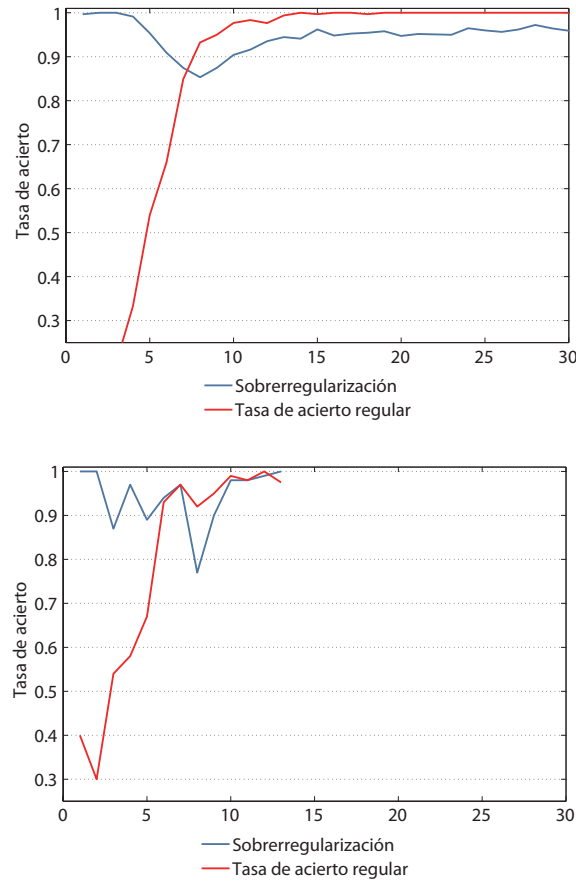


Figura 4.9: Sobrerregularización y tasa de producción de verbos regulares del modelo (a) y de Eve, una de las niñas del estudio de Marcus et al. [1992] (b).

Las figuras 4.9(a) y 4.9(b) muestran la curva de aprendizaje del modelo y de Eve, una de las niñas del estudio de Marcus et al. [1992]. La tasa de sobrerregularización y la tasa de producción de verbos regulares correctos se muestran de la forma usual. La tasa de

sobrerregularización se calcula como el número de formas verbales regularizadas entre el número total de formas irregulares producidas. Nótese que, por convención, en las gráficas se muestra $1 - \text{tasa de sobrerregularización}$. La tasa de producción de verbos regulares se calcula como el número de formas regulares producidas correctamente dividido entre el número total de formas regulares producidas. La curva de desarrollo del modelo (fig. 4.9(a)) muestra claramente la forma de U que suelen mostrar los niños durante la adquisición de las flexiones irregulares. Inicialmente, hay muy pocas formas irregulares flexionadas, pero aquellas que se flexionan suelen flexionarse de forma correcta. A continuación el modelo comienza a producir sobrerregularizaciones debido a que las reglas regulares comienzan a tener la utilidad suficiente como para competir con la analogía. Finalmente, la activación de las formas irregulares en la memoria declarativa se afianza dando lugar a la mejora del comportamiento hasta alcanzar un 100 % de aciertos. El modelo obtiene una tasa total de sobrerregularización del 4.32 %, en línea con los resultados mostrados por los niños. El estudio de Marcus et al. [1992] presenta una tasa de sobrerregularización media del 4.2 % en las muestras de habla espontánea de 25 niños.

4.2.2. Errores típicos

Como se comentó en la sección 3.1.2, los niños ingleses producen dos tipos de errores principales: errores de sobrerregularización y errores de doble marca. Los errores de sobrerregularización son, de lejos, los errores que más producen los niños. El modelo presentado es capaz de reproducir esos errores en un porcentaje similar: 83.8 % frente al 85.6 % de los niños. Muchos de los modelos anteriores presentan un porcentaje de sobrerregularización similar, ya que la mayoría se han centrado en la curva de desarrollo general y en las tasas de sobrerregularización. Sin embargo, apenas se ha prestado atención a los errores de doble marca. El modelo es capaz de reproducir estos errores en un porcentaje muy similar: un 16.2 % del total de errores frente al 14.4 % de los niños. Más aún, los tipos de errores producidos por el modelo son también similares a los producidos por los niños durante el proceso de adquisición de la morfología verbal. En ninguna de las simulaciones del modelo se ha producido ningún error distinto de estos dos (salvo los comentados a continuación, que no se incluyeron en el estudio de Marcus et al. [1992]). Por tanto, el modelo imita el proceso de adquisición de los niños no sólo en términos de tasas de error generales.

Además de los errores típicos de sobrerregularización y doble marca, existe otro tipo de error: los errores por analogía fonológica. Estos errores son de muy baja frecuencia (Según Xu y Pinker [1995], suponen tan sólo un 0.19 % del total de errores) pero su existencia indica que determinados procesos de similitud fonológica están presentes en la producción de formas verbales. En la mayoría de modelos existentes, estos errores no

Tabla 4.1: Porcentajes de error en la producción de formas verbales inglesas. Comparación de los resultados obtenidos por el modelo y por los niños de los estudios de Marcus et al. [1992] y Xu y Pinker [1995].

	Sobrerregularización	Doble Marca	Otros
Promedio de los niños	85.6	14.4	0.19
Modelo	83.8	16.2	1.03
r de Pearson:			0.999

han sido tenidos en cuenta. Sin embargo, a pesar de esta baja frecuencia, estos errores pueden ser fundamentales a la hora de definir los procesos involucrados en la producción de formas flexionadas. Los resultados de nuestro modelo en inglés muestran también que la influencia de la analogía a nivel fonológico es muy limitada. Tan sólo un 1.03 % de los errores se deben a esta causa. De nuevo, los resultados se mantienen en línea con los observados en los niños: la analogía a nivel morfológico, y por tanto la sobrerregularización, predominan. Más aún, haciendo un análisis cualitativo de los tipos de errores producidos por el modelo y los niños, se observa que el 94.6 % de los errores producidos por el modelo se dan en las mismas *islas de similitud* en las que se detectaron errores en el estudio de Xu y Pinker [1995]. Por tanto, se puede concluir que el modelo se ajusta tanto cuantitativa como cualitativamente al comportamiento observado en los niños.

4.2.3. Interacción frecuencia/regularidad

Como se comentó en la sección 3.1.2, existe una relación clara entre la frecuencia de uso de las formas irregulares y las tasas de sobrerregularización de las mismas. Dicha relación no se observa en las formas regulares. Para comprobar que esta relación es captada por el modelo, se siguió el enfoque propuesto por Maratsos [2000] y usado también por Clahsen et al. [2002]. Se dividieron las formas irregulares del vocabulario en cuatro grupos atendiendo a su frecuencia y se calcularon las tasas de sobrerregularización producidas por el modelo para cada grupo.

Tabla 4.2: Tasas de sobrerregularización de verbos ingleses de distintas frecuencias. Comparación de los resultados obtenidos por el modelo y por los niños del estudio de Maratsos [2000].

Frecuencia	Muy baja	Media-baja	Media-alta	Muy alta
Promedio de los niños	0.47	0.19	0.1	0.06
Modelo	0.118	0.046	0.019	0
r de Pearson:				0.996

La tabla 4.2 muestra la tasa de sobrerregularización media para los tres niños estudiados por Maratsos [2000] y la tasa de sobrerregularización media del modelo. El modelo muestra el mismo comportamiento que los niños (el coeficiente de correlación de Pearson es de 0.996). La primera conclusión que se puede extraer es que tanto los niños como el modelo muestran una correlación negativa entre la frecuencia de las formas irregulares y sus sobrerregularizaciones. Como se comentó en la sección 3.1.2.3, este hecho es predicho por las teorías de doble ruta. La activación en la memoria declarativa depende de la frecuencia de exposición a cada una de las formas verbales. Por tanto, las formas menos frecuentes son más susceptibles de ser sobrerregularizadas dado que es más difícil recordarlas directamente. La razón por la que las tasas de sobrerregularización del modelo son mucho menores que las de los niños estudiados por Maratsos [2000] es que el modelo está optimizado para simular los datos del estudio de Marcus et al. [1992]. Ese estudio implica a muchos más niños que reducen la tasa de sobrerregularización media (probablemente debido al bajo número de muestras de algunos de esos niños). Sin embargo, como se comentó anteriormente, el objetivo de este experimento era comprobar la predicción de las teorías de doble ruta sobre la correlación negativa entre la frecuencia y la tasa de sobrerregularización. A la vista de los resultados, este hecho queda confirmado.

En este experimento también se utilizaron los datos recogidos por van der Lely y Ullman [2001]. La figura 4.10 muestra los porcentajes de acierto del modelo y los niños en formas verbales regulares e irregulares de alta y baja frecuencia. Cada una de las tres gráficas muestra esos porcentajes en las tres etapas del desarrollo utilizadas en el estudio de van der Lely y Ullman [2001]. En este experimento se seleccionaron estas etapas de modo que las tasas de acierto en verbos regulares coincidieran con las tasas de acierto en cada uno de los tres grupos de edad del estudio de van der Lely y Ullman [2001]. Como puede verse, tanto los niños como el modelo muestran la influencia de la regularidad y la frecuencia en el porcentaje total de aciertos: los verbos irregulares son mucho más sensibles a la frecuencia de uso. Se cometen más errores en las formas menos frecuentes. Como indicaron Ellis y Schmidt [1998], existe una primera etapa en la que esos efectos se observan en igual medida en las formas regulares e irregulares. Sin embargo, en etapas posteriores, esa diferencia se atenúa en los verbos regulares mucho más rápidamente. El coeficiente de correlación de Pearson entre los datos obtenidos por el modelo y los datos empíricos es de 0.9256.

4.2.4. Generalización

En el caso de la generalización se utilizaron también los resultados del estudio empírico de van der Lely y Ullman [2001] comentado en la sección 3.1.2. Para ello, se midieron las

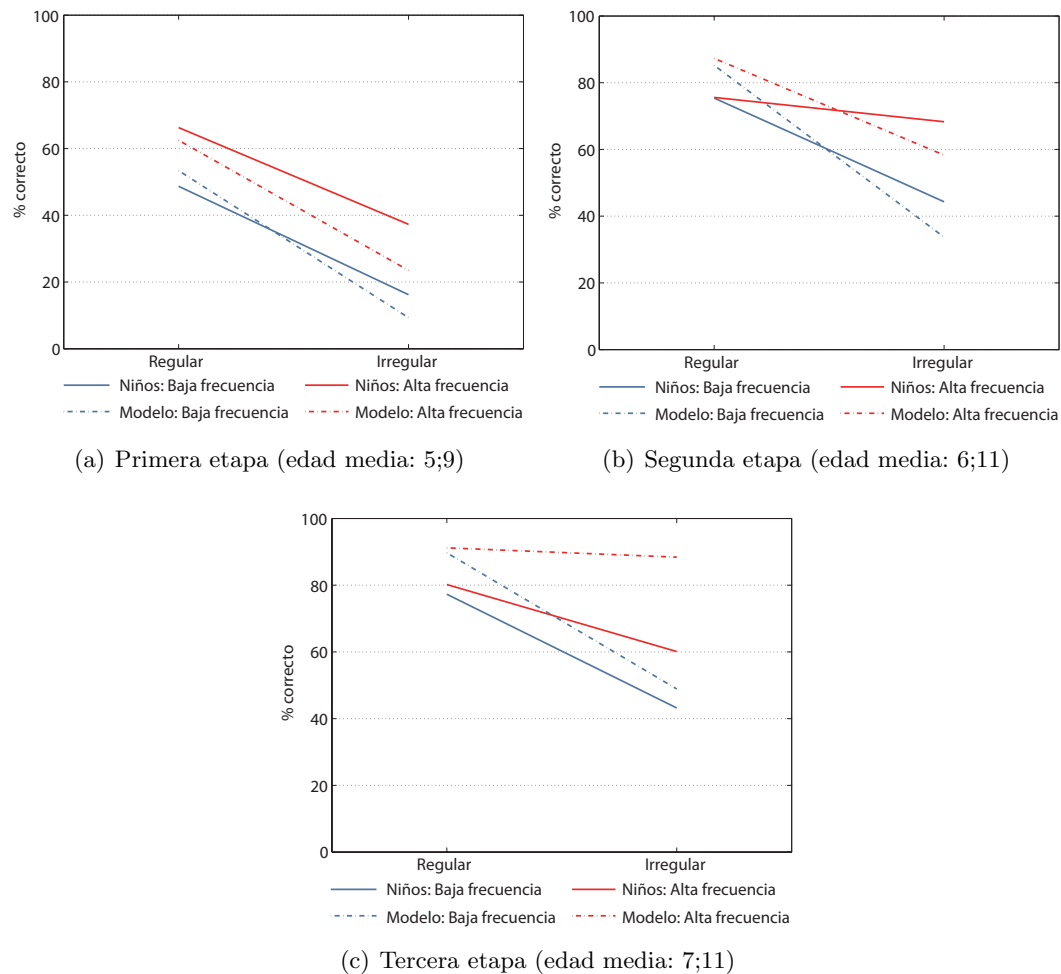
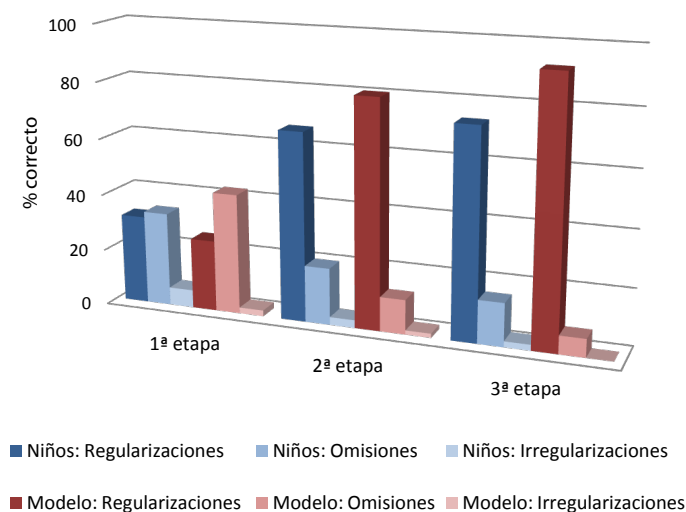


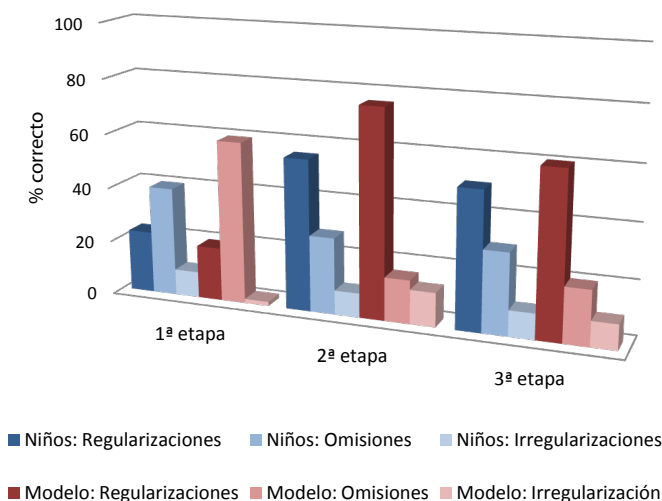
Figura 4.10: Interacción frecuencia/regularidad en el pasado del inglés en tres etapas de desarrollo distintas. Comparación de los resultados obtenidos por el modelo y por los niños del estudio de van der Lely y Ullman [2001]

tasas de regularizaciones, omisiones e irregularizaciones de los dos conjuntos de verbos usados en su estudio: verbos nuevos similares a verbos regulares (generalización regular) y verbos nuevos similares a formas irregulares (generalización irregular).

Las figuras 4.11(a) y 4.11(b) muestran respectivamente los resultados obtenidos en la generalización regular e irregular tanto por el modelo como por los tres grupos de niños del estudio de van der Lely y Ullman [2001]. De nuevo, las tres etapas del modelo mostradas en las gráficas se fijaron en aquellos puntos del desarrollo en los que las tasas de formas regulares conjugadas correctamente eran iguales a las de cada uno de los grupos de niños. El coeficiente de correlación de Pearson entre los resultados obtenidos por el modelo y los



(a) Generalización de formas similares a formas regulares



(b) Generalización de formas similares a formas irregulares

Figura 4.11: Generalización regular 4.11(a) e irregular 4.11(b). Comparación de los resultados obtenidos por el modelo y por los niños del estudio de van der Lely y Ullman [2001] (edades: 5;9, 6;11 y 7;11 respectivamente)

datos empíricos es de 0.9684. En cuanto a la generalización regular, el modelo muestra la misma tendencia a la regularización que los niños. En las dos últimas etapas las tasas de regularización son mucho más elevadas que las de los otros dos tipos de flexiones. El hecho de que en la primera etapa esto no ocurra se debe a que el modelo aún no ha aprendido las reglas regulares. Hecho que también se observa en los niños. En cuanto a la generalización

irregular, el ajuste a los resultados empíricos es también muy elevado. Sigue existiendo la tendencia a la regularización pero en este caso, esa tendencia se atenúa. De hecho en la tercera etapa la tasa de regularizaciones disminuye. Esto se debe a que las formas irregulares han alcanzado una activación elevada y estable en la memoria declarativa y son fácilmente recordadas. De este modo, pueden ser utilizadas como ejemplo para la analogía fonológica. Este hecho muestra cómo la similitud fonológica con formas ya adquiridas influye en cierta medida en la flexión de las formas verbales inglesas.

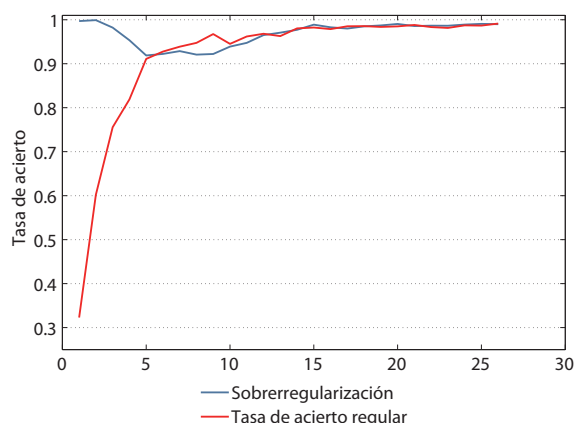
4.3. Experimento 2: Adquisición de la morfología verbal castellana

Este segundo experimento consiste en modelar la adquisición de la morfología verbal en castellano. Para ello, se usó el vocabulario y procedimiento comentados en las secciones 3.2.3 y 3.2.4. En las siguientes subsecciones se analizan los resultados del modelo en relación a cada uno de los fenómenos empíricos comentados en la sección 3.1.4 y se comparan esos resultados con los obtenidos por los niños.

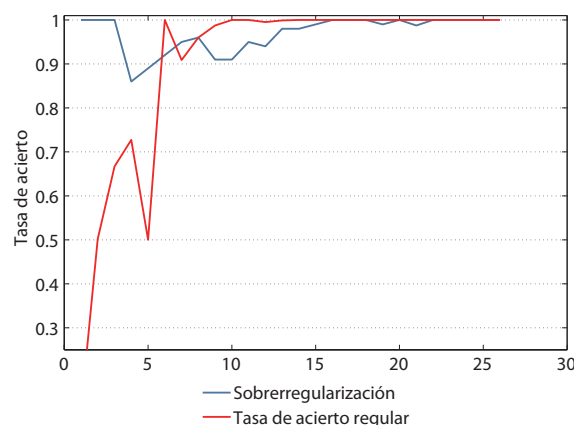
4.3.1. Aprendizaje en forma de U

Las figuras 4.12(a) y 4.12(b) muestran las curvas de aprendizaje del modelo y de María, una de las niñas del estudio de Clahsen et al. [2002] comentado en la sección 3.1.4. En ellas se muestra la tasa de sobrerregularización y la tasa de producción de verbos regulares correctos de la forma usual. La curva de desarrollo del modelo es muy similar a la mostrada en el caso del Inglés. El aprendizaje en forma de U se puede observar claramente en la curva de sobrerregularización. Inicialmente, hay muy pocas formas irregulares flexionadas, pero aquellas que se flexionan suelen flexionarse de forma correcta. A continuación el modelo comienza a producir sobrerregularizaciones para, finalmente mejorar su comportamiento hasta alcanzar un comportamiento adulto. El modelo obtiene una tasa total de sobrerregularización del 3.2 %, en línea con los resultados mostrados por los niños. Los niños estudiados por Clahsen et al. [2002] presentaron una tasa de sobrerregularización media del 3.4 % en las muestras longitudinales y un 13.2 % en los experimentos transversales. Como indican los autores, esta diferencia podría deberse al distinto tipo de muestras y al estilo semiestructurado de las grabaciones.

Del mismo modo, también se midieron las tasas de sobrerregularización y de producción de verbos regulares en presente y pasado para comprobar si el modelo mostraba las mismas diferencias mostradas por los niños de habla castellana. En su estudio, Clahsen



(a) Comportamiento del modelo

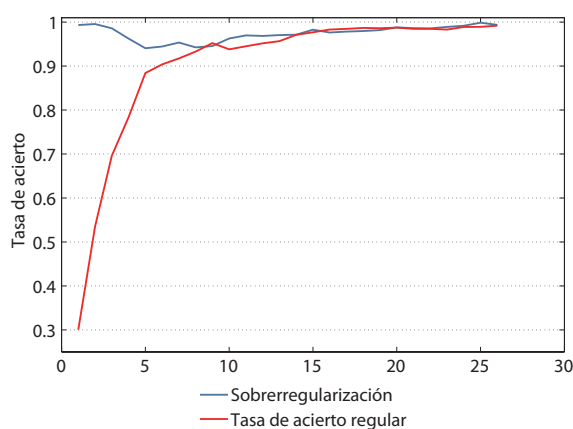


(b) Comportamiento de María

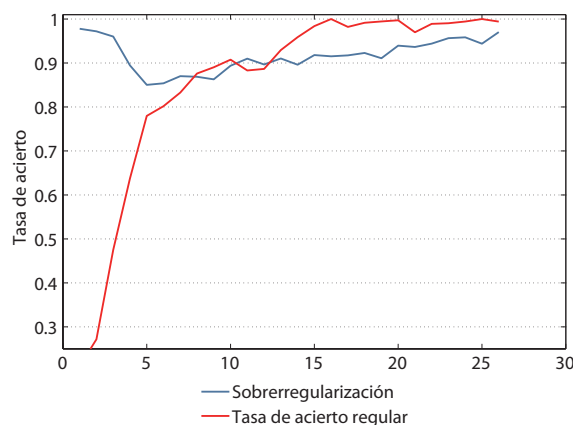
Figura 4.12: Sobrerregularización y tasa de producción de formas regulares en el modelo (a) y en María, una de las niñas del estudio de Clahsen et al. [2002] (b).

et al. [2002], obtuvieron tasas de sobrerregularización mucho más altas para las formas en pasado (14 %) que para las formas en presente (1.5 %). El modelo muestra unos valores similares. La sobrerregularización en formas de pasado alcanza el 11.6 % mientras que en presente no supera el 1.3 %. Más aún, las curvas de desarrollo para las formas verbales en presente y pasado son también similares a las producidas por los niños. Estas curvas pueden verse en las figuras 4.13(a) y 4.13(b), respectivamente. Como se esperaba, la curva de sobrerregularización de las formas de pasado es mucho más pronunciada que la de las formas en presente. Sin embargo, las dos curvas muestran el aprendizaje en forma de U ya comentado. Clahsen et al. [2002] indican que esta diferencia puede derivarse del hecho de que el tiempo pasado en castellano tiene más formas irregulares, es decir, más oportunidades para producir errores que en presente. De hecho, la distribución de formas

verbales en el SVI confirma esa hipótesis. Como se ha comentado antes, la mayoría de formas irregulares de presente son formas diptongadas (que no están incluidas en el análisis de la sobreregularización). Más aún, los irregulares de presente que no son diptongadas suelen tener una frecuencia muy alta. Este hecho los protege de la sobreregularización (véase la sección 4.3.3 para un análisis más detallado de los efectos de la frecuencia de las formas verbales). Por tanto, las sobreregularizaciones son menos comunes entre las formas de presente. Sin embargo, el mayor número de formas irregulares de pasado y sus frecuencias más bajas (comparadas con las de las formas irregulares de presente) implican menores niveles de activación en memoria. Este hecho provoca mayores fallos al intentar recordarlas y, por lo tanto, un mayor número de sobreregularizaciones.



(a) Producción de formas de presente simple



(b) Producción de formas de pasado simple

Figura 4.13: Sobreregularización y tasa de producción de formas regulares del modelo con formas de presente (a) y de pasado (b).

4.3.2. Errores típicos

Como se comentó en la sección 3.1.4, la gran mayoría de los errores producidos por los niños son errores de sobrerregularización. Mientras que sólo un pequeño porcentaje es debido a la irregularización de formas regulares. De acuerdo con Clahsen et al. [2002], más del 90 % (94.7 % en el lexema y 92.5 % en los sufijos) de los errores cometidos por los niños son errores de sobrerregularización. El modelo presenta esa misma distribución desigual de los errores. El 93.3 % del número total de errores son sobrerregularizaciones. Además, los errores de irregularización son principalmente del mismo tipo que los producidos por los niños. Los errores de irregularización en el lexema se dieron siempre con verbos que presentan formas irregulares en ese mismo tiempo. Ninguna forma verbal de un verbo con una conjugación completamente regular fue irregularizada. Por ejemplo, los niños producen errores como *cayí* en lugar de *caí*. Esto puede deberse a la sobreaplicación del lexema de la tercera persona del singular del pasado simple (*cayó*) a la primera persona del singular.

En la sección 3.1.4 también se comentó que entre las sobrerregularizaciones emerge un patrón con una frecuencia bastante elevada: los niños aplican algunos sufijos de verbos de la primera conjugación a verbos de la segunda o tercera conjugación. Por ejemplo, el verbo de la segunda conjugación *traer* es conjugado a veces en pasado como *trajé** en lugar de *traje* debido a que se aplica el sufijo de la primera conjugación *-é*. Este tipo de errores sugieren que los niños tratan de usar el paradigma de la conjugación correspondiente pero, cuando no pueden acceder a ese paradigma, tratan de copiar la información que necesitan de otros verbos. Dado que los verbos de la primera conjugación son, con mucha diferencia, los más frecuentes en castellano, estas sobreaplicaciones son siempre de sufijos de un verbo de la primera conjugación. Esto es exactamente lo que hace el modelo a través del mecanismo de *partial matching*. Cuando no es posible recordar la forma correcta, muchas veces se recuerda una forma que no coincide exactamente con la forma buscada. Dada la gran cantidad de verbos de primera conjugación en castellano, la mayoría de las veces ese recuerdo es de una forma de primera conjugación. En el caso de los niños estos errores constituyen el 6.1 % de los errores de sobrerregularización, mientras que en el caso del modelo, constituyen un 8.2 %.

Finalmente, se analizaron los errores presentes en las formas diptongadas. Como señalan Clahsen et al. [2002] en su estudio, la clasificación de las formas diptongadas como regulares o irregulares es controvertida. De ahí este análisis independiente. Todos los errores encontrados en las formas diptongadas se debieron a la aplicación del patrón regular (*juga** en lugar de *juega*). El modelo no produjo ni una sola vez el patrón inverso: ninguna for-

ma verbal fue erróneamente diptongada por el modelo. Estos resultados son exactamente iguales que los encontrados por Clahsen et al. [2002] en su estudio. Un total de 107 formas verbales de las 603 formas diptongadas fueron regularizadas (un 17.74 %), pero ni una sola forma fue erróneamente diptongada por los niños. El modelo produjo estos errores de regularización de formas diptongadas en un 22.3 % de los casos, mostrando, nuevamente, su ajuste a los datos empíricos tanto cualitativa como cuantitativamente.

Tabla 4.3: Porcentajes de error en la producción de formas verbales en español. Comparación de los resultados obtenidos por el modelo y por los niños del estudio de Clahsen et al. [2002].

	Sobrerregularización	Irregularización	Sobreaplicación 1ª conjugación	Formas diptongadas
Promedio de los niños	90.0	2.1	6.1	17.74
Modelo	93.3	1.0	8.2	22.3
r de Pearson:				0.998

La conclusión de este análisis cuantitativo y cualitativo es que, como puede verse en la tabla 4.3, el modelo imita el comportamiento de los niños no sólo en términos de tasas globales (en las que han centrado la atención los modelos existentes hasta la fecha). También los tipos de errores cometidos por el modelo y las formas en que se cometen son similares a los producidas por los niños españoles al adquirir la morfología verbal.

4.3.3. Interacción frecuencia/regularidad

Al igual que en el experimento previo, es importante comprobar la relación entre la frecuencia de uso de cada una de las formas irregulares y sus tasas de sobrerregularización. Para ello, se siguió el enfoque propuesto por Maratsos [2000], también utilizado por Clahsen et al. [2002] y que se comentó en la sección 3.1.4. Las formas irregulares fueron divididas en cuatro grupos dependiendo de su frecuencia en el vocabulario de entrada: Muy poco frecuentes (formas cuya frecuencia pertenece al primer cuartil de frecuencias), poco frecuentes (formas en el segundo cuartil), frecuentes (formas en el tercer cuartil) y muy frecuentes (formas por encima del tercer cuartil). Una vez configurados los grupos, se calculó la tasa media de sobrerregularización para cada grupo de formas verbales y se comparó con las tasas de sobrerregularización producidas por los niños.

La tabla 4.4 muestra las tasas de sobrerregularización producidas por el modelo y tres de los niños estudiados por Clahsen et al. [2002]. A pesar de las diferencias individuales que se pueden apreciar, las tasas de sobrerregularización del modelo están en el mismo rango

Tabla 4.4: Tasas de sobrerregularización en castellano para los distintos grupos de frecuencias. Comparación de los resultados obtenidos por el modelo y por los niños del estudio de Clahsen et al. [2002]

Frecuencia	Muy baja	Baja	Alta	Muy alta
Idaira	0.15	0.02	-	-
Koki	0.24	0.11	-	-
María	0.11	0.003	0	0.02
Promedio de los niños	0.166	0.044	0	0.02
Modelo	0.153	0.037	0.001	0
r de Pearson:				0.993

- significa que el niño no produjo ningún verbo en ese rango de frecuencias.

que las observadas en los niños. De hecho, el coeficiente de correlación de Pearson entre los datos de los niños y los de el modelo es de 0.993. Las formas verbales de baja frecuencia presentan tasas de sobrerregularización mucho mayores que las presentadas por las formas más frecuentes. Y este hecho se comprueba tanto en los tres niños (excepto por la bajísima tasa de sobrerregularización que presenta María en formas verbales frecuentes) como en el modelo. Por tanto, parece claro que la frecuencia de cada forma irregular juega un papel crucial en el proceso de sobrerregularización. Como se ha explicado anteriormente, este hecho se debe a que los procesos de almacenamiento en memoria y recuerdo parecen estar íntimamente ligados a la frecuencia de exposición. La activación en memoria de las formas de mayor frecuencia es más alta, con lo que, su recuerdo es más fácil, bloqueándose la aplicación de una regla regular. Sin embargo, las formas irregulares de baja frecuencia son más difíciles de recordar debido a su menor activación en memoria. Por tanto, es necesario recurrir a mecanismos alternativos, como la aplicación de la regla regular, para poder producirlas.

4.3.4. Generalización

Con el objetivo de analizar la capacidad de generalización del modelo se utilizaron el diseño y los resultados del estudio empírico de Pérez-Pereira [1989], comentados en la sección 3.1.4. Para ello, se midieron las tasas de regularización de los verbos artificiales usados en su estudio en los cuatro momentos del desarrollo definidos también en dicho trabajo y se agruparon los resultados por conjugaciones. Como en los casos anteriores, las cuatro etapas del modelo mostradas en las gráficas se fijaron en aquellos puntos del desarrollo en los que las tasas de formas regulares reales conjugadas correctamente eran iguales a las de cada uno de los grupos de niños.

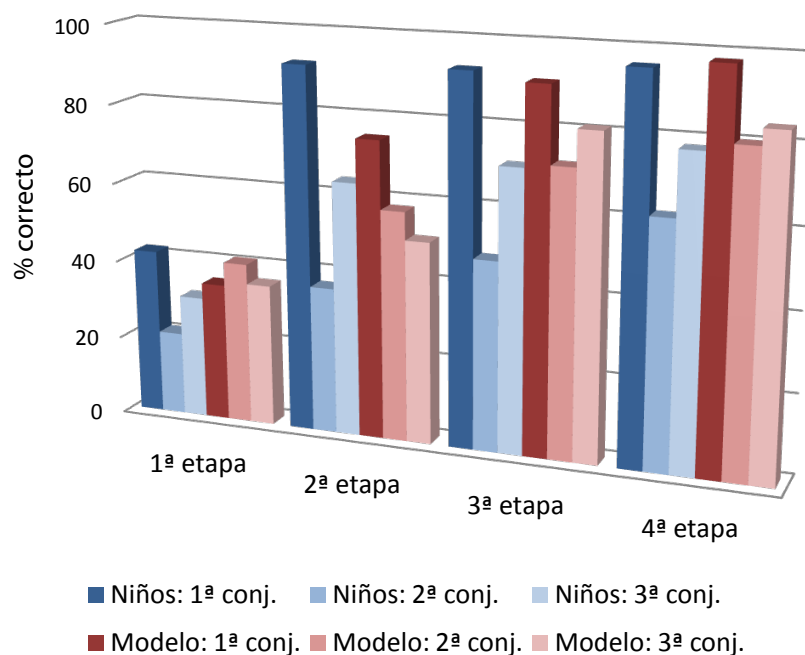


Figura 4.14: Generalización en castellano. Comparación de los resultados obtenidos por el modelo y por los niños del estudio de Pérez-Pereira [1989] (edades: 3;3, 4;8, 5;8 y 6;3 respectivamente)

La figura 4.14 muestra los resultados obtenidos en el experimento de generalización por el modelo y por los cuatro grupos de niños del estudio de Pérez-Pereira [1989]. El coeficiente de correlación de Pearson entre los resultados obtenidos por el modelo y los datos empíricos es de 0.8467. Como en el caso de los niños, las tasas de regularización son muy inferiores en la primera etapa, en la que las reglas regulares aun no han sido adquiridas y consolidadas. Además, se mantienen los otros dos aspectos observados en los niños: las tasas de regularización en la primera conjugación son mayores y se presenta un buen número de sobreaplicaciones de sufijos de la primera conjugación a formas verbales de la segunda o tercera conjugación. Esto viene a refrendar los efectos ya comentados de la frecuencia y regularidad que suelen presentar los verbos de la primera conjugación.

4.4. Discusión general

El modelo propuesto en este trabajo de tesis es la primera implementación computacional del modelo Declarativo/Procedural explicado en la sección 2.3.1. El modelo recoge, a través del uso de ACT-R, la distinción clave del modelo DP entre memoria declarativa y

memoria procedural. La memoria declarativa se encarga de la representación y aprendizaje de las formas verbales incluyendo sus significados, características gramaticales abstractas y su fonología (característica, esta última, obviada en la mayoría de modelos simbólicos). La memoria procedural almacena y adquiere las reglas regulares. Sin embargo, como propone el modelo DP, los mecanismos utilizados no son específicos del lenguaje sino que son compartidos por muchas otras tareas (como puede verse en muchos de los modelos ACT-R existentes hasta la fecha). Finalmente, estos dos sistemas interactúan también como propone el modelo DP. El sistema procedural abstrae las reglas regulares a partir de los ejemplos almacenados en la memoria declarativa. Ambos sistemas pueden recoger el mismo tipo de conocimiento: las formas regulares son almacenadas en la memoria declarativa y pueden ser producidas sin necesidad de la intervención de reglas en caso de que tengan la suficiente activación. Por último, los dos sistemas interaccionan también de forma competitiva: si la memoria declarativa es capaz de encontrar la forma verbal buscada, se bloquea el uso de la memoria procedural. Además de las características generales del modelo DP, las principales aportaciones del modelo son:

- **Ajuste a los datos empíricos.** Los resultados obtenidos tanto en las simulaciones en inglés como en castellano replican los observados en los niños tanto cuantitativa como cualitativamente. De hecho, el modelo supera algunas de las limitaciones de los modelos existentes para imitar el comportamiento de los niños. La mayoría de los modelos existentes se han centrado en la curva de desarrollo en general sin prestar especial atención a los distintos tipos de errores existentes. En este trabajo de tesis se propone lo contrario: obtener la curva de desarrollo general a partir de un correcto modelado de todos los tipos de errores existentes, como por ejemplo los errores de doble marca como *broked** o los errores por similitud fonológica como *puniste**
- **Modelado del castellano.** El modelo es el primer modelo del proceso de adquisición de la morfología verbal castellana. El sistema flexivo castellano es mucho más complejo que el del inglés tanto por su mayor número de sufijos como por su heterogénea distribución de irregularidades. Estos dos hechos hacen que el modelado en castellano sea mucho más complicado y sugerente que el del inglés. Hasta donde nosotros sabemos, el único modelo conexionista de un lenguaje altamente flexionado es el propuesto por Karaminis y Thomas [2010] para el griego. Y el único modelo simbólico es una versión previa de este modelo [Oliva et al., 2010].
- **Carácter translingüístico.** Probablemente, la característica más importante del modelo es su carácter translingüístico. A pesar de la falta de este tipo de modelos, su importancia está fuera de toda duda. El hecho de centrar la atención en el estudio

y modelado en un lenguaje en particular lleva a la pregunta de si las conclusiones obtenidas son extensibles a la adquisición y procesamiento del lenguaje en general o simplemente se derivan de las características particulares del idioma estudiado. En particular, el inglés no parece ser el idioma más adecuado para obtener conclusiones generales. Tanto la simplicidad de su sistema flexivo como la distribución de frecuencias entre formas regulares e irregulares hace del inglés un idioma muy particular y, en cierto modo, muy simple. Por tanto, el sistema flexivo inglés no debería ser la única fuente de información para entender como adquirimos y procesamos el lenguaje. El modelo propuesto en este trabajo de tesis es capaz de adquirir tanto el sistema flexivo inglés como el castellano. Por tanto, propone un modelo mucho más general sobre las representaciones y procesos cognitivos involucrados en la adquisición de la morfología. De particular interés es la forma en que el modelo muestra la estrecha relación entre el entorno y la genética típica del aprendizaje humano en general. Las simulaciones del inglés y el castellano comienzan con idénticas estructuras y mecanismos. Sin embargo, la influencia del entorno, en otras palabras, de las distintas características del lenguaje al que es expuesto, da forma a los procesos subyacentes para dar lugar a la adquisición de las formas regulares y la producción de los distintos patrones de errores.

- **Plausibilidad psicológica.** Por último, es de especial importancia la plausibilidad psicológica del modelo propuesto. Para que las conclusiones de un modelo de adquisición del lenguaje tengan validez, es necesario tener en cuenta las restricciones impuestas por lo que se conoce acerca del procesamiento del lenguaje y la cognición en general. En otras palabras, los modelos cognitivos no han de ser evaluados sólo en términos de su capacidad para replicar el comportamiento humano sino también en términos de su plausibilidad psicológica. Muchos de los modelos existentes se basan en supuestos difícilmente justificables. Por ejemplo, como se comentó en la sección 2.4, los modelos conexionistas se basan en la capacidad de los niños para predecir las formas verbales que escuchan. La validez de esta suposición no ha sido demostrada y, por tanto, las conclusiones obtenidas no son tan sólidas. En este sentido, ACT-R ha sido criticada por su flexibilidad Wexler [1990]. La versión 6.0 de ACT-R recoge más de 60 parámetros que pueden ser ajustados libremente. Este hecho ha sido utilizado por muchos autores para argumentar que un modelo ACT-R puede producir cualquier tipo de comportamiento con la combinación de parámetros adecuada. Por tanto, es necesario restringir los valores posibles de los parámetros para que se ajusten a las características cognitivas de nuestro cerebro. Para ello, el modelo usa para los distintos parámetros, valores similares a los utilizados en muchos otros modelos

de ACT-R en diferentes tareas (véase el apéndice B). Se utilizó una base de datos que recoge la configuración de parámetros de más de cuarenta modelos ACT-R. Los valores de los parámetros del modelo se encuentran en los rangos promedio de todos esos trabajos. De este modo, el modelo minimiza su flexibilidad e incrementa su poder predictivo teniendo en cuenta limitaciones cognitivas generales del ser humano. Por otra parte, la plausibilidad psicológica del modelo se ve reforzada por el hecho de usar valores similares en las simulaciones del inglés y el castellano. A pesar de las grandes diferencias entre esos dos sistemas flexivos, ambos son adquiridos usando valores de parámetros muy similares (es decir, las mismas limitaciones cognitivas). Por tanto, el modelo no asume ninguna habilidad especial para los niños hablantes de uno u otro idioma.

Parte II

Aplicación a la caracterización y diagnóstico de trastornos cognitivos.

Metodología de caracterización y diagnóstico de trastornos cognitivos

Todas las teorías son legítimas y ninguna tiene importancia. Lo que importa es lo que se hace con ellas.

Jorge Luis Borges.

En este capítulo se presenta la metodología de caracterización y diagnóstico de trastornos cognitivos que constituye el núcleo de la segunda parte de este trabajo de tesis. En primer lugar, en la sección 5.1 se comenta la problemática general existente en torno a la caracterización y diagnóstico de trastornos cognitivos, provocada por dos causas principales ya comentadas en el capítulo 1: la heterogeneidad y el solapamiento. Además se presentan las medidas de evaluación que se utilizarán en este trabajo de tesis. En la sección 5.2 se presenta la metodología de ayuda a la caracterización y al diagnóstico de trastornos cognitivos propuesta en esta segunda parte de la tesis. La metodología se basa en la utilización, no sólo de las variables conductuales, sino también de las variables extraídas a partir de un modelo computacional cognitivo y el uso de esa información con diferentes técnicas de aprendizaje automático para la ayuda a la caracterización y al diagnóstico. Las subsecciones 5.2.1, 5.2.2, 5.2.3 y 5.2.4 detallan cada una de las cuatro etapas de las que consta la metodología propuesta: detección de diferencias a nivel conductual, modelo computacional cognitivo, individualización y aplicación de técnicas de aprendizaje automático.

5.1. Caracterización y diagnóstico de trastornos cognitivos

Como se comentó en la introducción, existen dos factores clave que dificultan la caracterización y el diagnóstico de la mayoría de los trastornos cognitivos: la heterogeneidad existente en los perfiles de comportamiento dentro de un mismo trastorno y el solapamiento existente entre distintos trastornos. Los métodos actuales de caracterización y diagnóstico de muchos trastornos cognitivos tienen problemas para evitar esas dos dificultades puesto que se basan únicamente en variables de comportamiento [Leonard, 1998]. Dado que el comportamiento es muy distinto en cada individuo y, además, es compartido por diferentes trastornos, resulta difícil realizar un diagnóstico diferencial e individual partiendo sólo de información conductual. Sin embargo, en la mayoría de los casos, un diagnóstico correcto y temprano es clave para atenuar la discapacidad. Además, una correcta caracterización del trastorno de una forma individualizada es vital para ayudar al diseño de terapias personalizadas mucho más eficaces. Por otra parte, las consecuencias de un diagnóstico erróneo son muy negativas. Un error al diagnosticar a un individuo que no está afectado por la enfermedad conlleva un gasto innecesario de recursos junto con los inconvenientes para el individuo derivados de recibir un determinado tratamiento o terapia. Un error al diagnosticar a un individuo que está afectado por el trastorno puede provocar el agravamiento irremediable de sus efectos. Por tanto, es necesario encontrar métodos más efectivos para la caracterización y el diagnóstico de trastornos cognitivos tanto a nivel general como particularizando en cada paciente. Es importante encontrar las causas que provocan un determinado trastorno diferenciándolas de las que provocan un trastorno diferente pero con patrones de comportamiento similares. Y es necesario conocer en qué medida afecta cada una de esas causas a cada individuo con el objetivo de diseñar tratamientos o terapias personalizadas.

Uno de los objetivos de este trabajo de tesis se centra en la ayuda a la caracterización y al diagnóstico de dos trastornos cognitivos: el trastorno específico del lenguaje (TEL) y la enfermedad de Alzheimer (EA). Como se verá a continuación, ambos son un claro ejemplo de trastorno caracterizado por la heterogeneidad de su perfil de comportamiento y el solapamiento con otros trastornos. Por tanto, en ambos casos el diagnóstico temprano es muy complicado. Sin embargo, en los dos casos un diagnóstico temprano y personalizado es de vital importancia a la hora de atenuar los efectos del trastorno. El TEL ha sido estudiado en este trabajo de tesis porque supone una aplicación directa del modelo presentado en la primera parte de este trabajo de tesis. Como se verá en los próximos capítulos, los niños afectados por el TEL muestran grandes problemas en la adquisición y procesamiento de la morfología verbal y por tanto, se utilizó este trastorno para comprobar la capacidad

		DIAGNÓSTICO REAL	
		POSITIVO	NEGATIVO
CLASIFICACIÓN	POSITIVO	VERDADERO POSITIVO	FALSO POSITIVO
	NEGATIVO	FALSO NEGATIVO	VERDADERO NEGATIVO

Figura 5.1: Matriz de confusión para un clasificador binario.

de diagnóstico de la información extraída a través del modelo computacional cognitivo presentado. La enfermedad de Alzheimer ha sido estudiada en este trabajo de tesis por dos razones fundamentales: permite comprobar la generalidad tanto del modelo como de la metodología propuesta y además, aumenta el ámbito de aplicación de este trabajo. Como se ha señalado en la introducción, uno de los objetivos de este trabajo es presentar una metodología de carácter general, no restringida a un único trastorno cognitivo. Además, el hecho de utilizar el modelo presentado para modelar un trastorno de la etapa adulta muestra la capacidad del modelo tanto para imitar los mecanismos de adquisición como de procesamiento del lenguaje. A partir de la hipótesis que propone que las estructuras y procesos involucrados en la adquisición y procesamiento del lenguaje intervienen, a su vez, en muchos otros procesos cognitivos, en este trabajo se propone la idea de que el procesamiento del lenguaje puede servir, en cierto modo, como un indicador del estado de esas estructuras y mecanismos subyacentes. Si alguna de esas estructuras o mecanismos está dañado en un determinado trastorno cognitivo es posible que se observen ciertos errores en el procesamiento del lenguaje. Quizás incluso antes de que el trastorno cognitivo en sí pueda ser diagnosticado.

5.1.1. Medidas de evaluación

A la hora de evaluar cualquier herramienta de diagnóstico, es importante tener en cuenta los aciertos y errores al diagnosticar tanto a los individuos realmente afectados por el trastorno como a los individuos sanos. La medida de evaluación más simple es la tasa de aciertos, es decir, el porcentaje de individuos afectados por la enfermedad que han sido diagnosticados como tal. Sin embargo, en muchos casos, ésta no es una medida apropiada del comportamiento de un método de diagnóstico y se han definido otras medidas en base a las cuatro categorías que forman la matriz de confusión de un clasificador binario (figura 5.1).

A partir de estas cuatro categorías se definen distintas medidas de evaluación de la bondad de los distintos métodos de diagnóstico. Las principales medidas utilizadas son las siguientes (definiciones adaptadas de Lang [1997]).

- *Sensibilidad*: Es la capacidad de un test para clasificar correctamente a un individuo que tiene la enfermedad¹.

$$Sensibilidad = \frac{VP}{VP + FN} \quad (5.1)$$

- *Especificidad*: Es la capacidad de un test para clasificar correctamente a un individuo que no tiene la enfermedad.

$$Especificidad = \frac{VN}{VN + FP} \quad (5.2)$$

- *Tasa de probabilidad positiva*: Se define como la probabilidad de que un individuo con la enfermedad sea clasificado correctamente dividida entre la probabilidad de que un individuo sin la enfermedad sea diagnosticado erróneamente. Su valor se puede calcular directamente a partir de los valores de sensibilidad y especificidad:

$$LR+ = \frac{sensibilidad}{1 - especificidad} \quad (5.3)$$

Una tasa de probabilidad positiva de, por ejemplo, 8 indica que la probabilidad de que el resultado del test sea positivo en un paciente con la enfermedad es ocho veces mayor que la probabilidad de que sea positivo en un paciente que no la tiene. Por tanto, cuanto mayor sea el valor de esta medida, mejor será la capacidad de diagnóstico del test.

- *Tasa de probabilidad negativa*: Se define como la probabilidad de que un individuo con la enfermedad sea clasificado erróneamente dividida entre la probabilidad de que un individuo sin la enfermedad sea clasificado correctamente. Su valor se puede calcular a partir de los valores de sensibilidad y especificidad:

$$LR- = \frac{1 - sensibilidad}{especificidad} \quad (5.4)$$

- *Curva ROC*: Las curvas ROC muestra la relación entre la sensibilidad y la especificidad de un método de clasificación. Un clasificador perfecto obtendría un 100 %

¹Las abreviaturas VP, VN, FP y FN se refieren a las clases “verdadero positivo”, “verdadero negativo”, “falso positivo” y “falso negativo” que se muestran en la figura 5.1

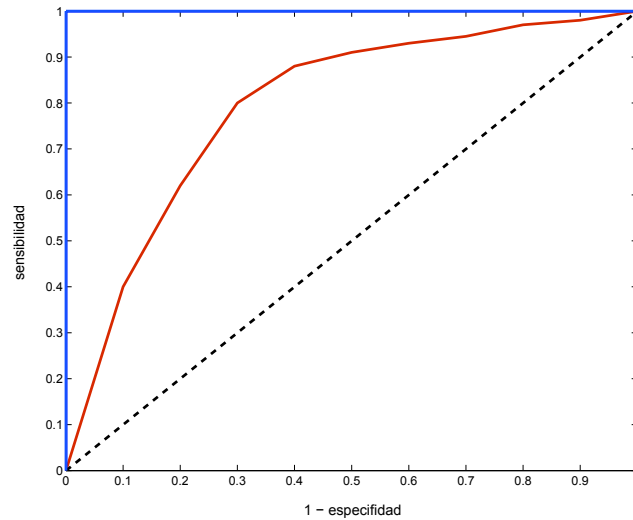


Figura 5.2: Curvas ROC de distintos clasificadores binarios.

de sensibilidad y especificidad. Sin embargo, suele haber una relación inversamente proporcional entre ambas medidas: a mayor sensibilidad, menor especificidad. Esta relación se representa mediante las curvas ROC, que muestran los valores de esas dos variables variando el umbral a partir del cual el clasificador determina si un caso es positivo o negativo. La representación gráfica es similar a la mostrada en la figura 5.2. La curva azul pertenece a un clasificador perfecto: existe un umbral para el cual se obtiene una sensibilidad y especificidad del 100 %. La línea punteada correspondería a un clasificador aleatorio y, por tanto, las típicas curvas ROC (como la curva roja) se sitúan entre esas dos curvas. Una forma de comparar numéricamente las capacidades de varios clasificadores es obtener el área bajo la curva (AUC). A mayor área, mejor comportamiento del clasificador.

Algunos autores apuntan que para que un método de diagnóstico sea considerado aceptable, ha de mostrar unos porcentajes de sensibilidad y especificidad por encima del 80 % [Plante y Vance, 1994]. En cuanto a las tasas de probabilidad positiva y negativa, se considera que un test tiene un poder discriminante aceptable si tiene una tasa de probabilidad positiva por encima de 10 y una tasa de probabilidad negativa por debajo de 0.1 [Gabani et al., 2011]. Las consecuencias de que un determinado método de diagnóstico obtenga unos resultados pobres con alguna de estas medidas son, obviamente, negativas en todos los casos. Sin embargo, en este trabajo de tesis se considerará que es más importante la optimización de la sensibilidad y, por extensión, de la tasa de probabilidad positiva. Una baja especificidad, es decir, una gran cantidad de falsos positivos, implica la aplicación de

tratamiento o terapia a individuos que realmente no están afectados por el trastorno. En otras palabras, implica un inconveniente para el paciente y un gasto de recursos innecesario. Sin embargo, las consecuencias de una baja sensibilidad son más dramáticas ya que implican dejar sin tratamiento a un individuo afectado por el trastorno. Hecho que, en la mayoría de los casos, conlleva el agravamiento irremediable del trastorno.

5.2. Metodología para la caracterización y diagnóstico de trastornos cognitivos

Como comentamos en la introducción, gran cantidad de trastornos cognitivos se caracterizan por un perfil de comportamiento que se manifiesta de distintas formas en distintos individuos y que es compartido con otros trastornos cognitivos similares. Estas características implican que la mera observación del comportamiento puede ser insuficiente para realizar un diagnóstico preciso (sobre todo en etapas tempranas en las que esas dos características se dan de una forma más acentuada). Sin embargo, tanto las técnicas clásicas de diagnóstico de estos trastornos como algunas de las técnicas más recientes siguen utilizando como única fuente de información distintas medidas del comportamiento observado. De ahí que a día de hoy exista una carencia de métodos fiables, no invasivos y de bajo coste que permitan diagnosticar determinados trastornos cognitivos de forma temprana e individualizada.

En este capítulo se presenta una metodología general que trata de superar los problemas de los métodos basados en la observación del comportamiento. La idea central consiste en utilizar cierta información sobre las causas que provocan cada uno de los perfiles de comportamiento observados ya que teniendo algún tipo de conocimiento sobre esos mecanismos subyacentes es posible que se pudieran mejorar tanto la caracterización como el diagnóstico del trastorno cognitivo estudiado. Con esa idea general en mente, se han tenido en cuenta dos requisitos fundamentales a la hora de diseñar la metodología: generalidad y personalización.

- *Generalidad*: La metodología de caracterización y ayuda al diagnóstico no debe ser diseñada para una tarea específica o para un trastorno cognitivo en concreto. Se pretende que la metodología sea aplicable a cualquier trastorno cognitivo independientemente de sus características. Más aún, la metodología ha de tener en cuenta el solapamiento existente. Por tanto, ha de ser capaz de diferenciar entre distintos trastornos que comparten síntomas a nivel de comportamiento (diagnóstico diferencial) y entre distintos subtipos y variantes dentro de un mismo trastorno.



Figura 5.3: Esquema de la metodología de ayuda a la caracterización y al diagnóstico.

- *Personalización*: La metodología ha de caracterizar y diagnosticar cada uno de los trastornos particularizando en las peculiaridades de cada individuo. Como se ha señalado antes, la heterogeneidad de muchos trastornos cognitivos es un punto clave. De ahí que una caracterización y diagnóstico individualizado sea vital para el diseño y desarrollo de terapias más adecuadas.

Para conseguir estos objetivos se propone una metodología de cuatro etapas. Cada una de ellas viene motivada por los resultados obtenidos por los enfoques actuales de diagnóstico y, por tanto, trata de superar las limitaciones observadas en cada uno de ellos. Estas limitaciones pueden resumirse en tres puntos principales:

- Los métodos actuales usan únicamente variables conductuales para emitir un diagnóstico. Dadas las condiciones de heterogeneidad y solapamiento comentadas, esto parece ser insuficiente.
- Los métodos actuales se centran en el estudio de un perfil de comportamiento general. De nuevo, dada la alta heterogeneidad presente en los trastornos cognitivos, es importante tener en cuenta las diferencias individuales y el grado de afectación en cada paciente.
- Los métodos actuales usan técnicas de análisis y procesado de la información que no son adecuadas. Por ejemplo, en muchos trabajos se usan técnicas estadísticas de separación lineal (como el análisis discriminante lineal). Pero dada la complejidad del problema, resulta difícil pensar que se esté ante un problema separable linealmente. Por tanto, los resultados pueden ser mejorados mediante el uso de técnicas más sofisticadas.

Las cuatro etapas de la metodología se muestran en la figura 5.3 y se resumen a continuación. La primera de ellas es compartida con los métodos clásicos de diagnóstico y se basa en la mera observación del comportamiento. A partir de ahí, cada una de las 3 etapas siguientes trata de abordar cada una de las 3 limitaciones que se acaban de citar:

- *Detección de diferencias a nivel conductual*: La primera etapa de la metodología consiste en encontrar una tarea o conjunto de tareas en la que los pacientes presenten diferencias significativas a nivel conductual con respecto a un grupo de individuos sanos. Esta primera etapa coincide con las técnicas actuales de diagnóstico y, por tanto, puede aprovechar algunos de sus resultados. En particular, en este trabajo de tesis se utilizarán medidas lingüísticas obtenidas bien a través de muestras de habla espontánea (en el caso del TEL) o bien a través de test del lenguaje (en el caso de la EA). El uso de medidas lingüísticas viene motivado por el potencial discriminatorio que han mostrado estas medidas tanto en el caso del TEL [Simon-Cereijido y Gutiérrez-Clellen, 2007] como en el caso de la EA en inglés y en castellano [Stevens et al., 1996; Bucks et al., 2000; Cuetos et al., 2003].
- *Modelado computacional cognitivo*: La siguiente fase consiste en el diseño e implementación de un modelo computacional cognitivo para la tarea o tareas seleccionadas en el paso previo. La plausibilidad psicológica del modelo es un factor clave para el éxito de la metodología. El modelo ha de ser capaz de mostrar tanto el comportamiento normal como el deficitario. Pero es también de gran importancia cómo se producen esos comportamientos y qué diferencias existen entre un modelo sano y uno deficitario porque esa información es la que será utilizada en el proceso de diagnóstico. Cuanto mejor emule el modelo los procesos involucrados en la tarea modelada, más útil será la información obtenida de él. El uso del modelado computacional cognitivo viene motivado por las limitaciones que presentan los métodos actuales basados en variables conductuales. Dado que, como se ha comentado, el comportamiento es altamente heterogéneo y se solapa con otros trastornos, la mera observación del mismo parece no ser suficiente para obtener un diagnóstico diferencial y personalizado. El modelado computacional cognitivo permite ir un paso más allá y medir determinadas variables cognitivas que pueden ser utilizadas para caracterizar las causas que provocan los distintos comportamientos tanto normales como deficitarios. El conocimiento de estas causas podría ser de gran ayuda en el proceso de diagnóstico. Además, el modelado computacional cognitivo es una técnica no invasiva y de bajo coste, dos características fundamentales para facilitar la amplia aplicación de la metodología [Jarrold et al., 2010].
- *Modelado del individuo*: Dada la gran heterogeneidad de los perfiles de comportamiento de la mayoría de trastornos cognitivos, cualquier metodología de diagnóstico debe tener en cuenta las diferencias individuales. Por tanto, nuestra metodología trata de modelar el comportamiento particular de cada uno de los individuos en lugar de centrarse en un perfil de comportamiento promedio. En esta etapa de la

metodología se trata de obtener un modelo diferente para cada uno de los perfiles de comportamiento observados, tanto normales como deficitarios. Es decir, el objetivo es encontrar las combinaciones de parámetros del modelo que mejor se ajustan a cada uno de los comportamientos observados. Por lo tanto, esta etapa de la metodología consiste básicamente en una tarea de optimización.

- *Aplicación de técnicas de aprendizaje automático:* La etapa final de la metodología consiste en la aplicación de distintas técnicas de aprendizaje automático haciendo uso de la información de los distintos modelos obtenidos en la etapa anterior. En concreto, en este trabajo de tesis se propone el uso de tres tipos de técnicas: selección de atributos, clasificación y agrupamiento. Las técnicas de selección de atributos se usarán con el objetivo de comprobar el valor de la información obtenida a través del modelado computacional frente a la información conductual. Las técnicas de clasificación se usarán con el objetivo de demostrar la capacidad discriminatoria de la metodología y, en consecuencia, su valía como método de ayuda al diagnóstico. Por último, las técnicas de agrupamiento se usarán con el objetivo de caracterizar las distintas causas que provocan un determinado trastorno (y sus subgrupos) y, por tanto, apoyar o refutar las teorías existentes en torno al trastorno. El uso de técnicas de aprendizaje automático viene motivado por los resultados obtenidos en trabajos recientes. Las técnicas de aprendizaje automático aplicadas al diagnóstico superan a los enfoques clásicos tanto en el caso del TEL [Gabani et al., 2011; Oliva et al., 2013] como en el caso de la EA [Lehmann et al., 2007].

Estas cuatro etapas que conforman la metodología de ayuda al diagnóstico, han de ser aplicadas tanto a pacientes diagnosticados con la enfermedad como a grupos de individuos sanos con el objetivo de obtener una amplia base de datos tanto de medidas conductuales como de valores de los parámetros del modelo ajustados a cada perfil de comportamiento. Con esos valores se construyen los distintos clasificadores que se usarán en el proceso de ayuda al diagnóstico. Una vez que se tienen esos clasificadores, cada vez que se presenta un individuo nuevo se han de recoger muestras conductuales (etapa 1), se han de optimizar los parámetros del modelo para ajustarse a ese comportamiento observado y se han de aplicar los clasificadores para obtener un resultado en términos de diagnóstico. Una última característica importante de nuestra metodología es que ese diagnóstico no es un simple diagnóstico binario (en términos de *afectado* o *no afectado* por el trastorno) sino que, observando los valores de los parámetros del modelo, se puede comprobar en qué grado están afectadas distintas estructuras cognitivas permitiendo el diseño de terapias individualizadas adecuadas a cada paciente.

En las siguientes subsecciones se comentan en detalle cada una de las etapas y se describen las distintas opciones de implementación de cada una de ellas. Es importante señalar que cada una de las etapas, en particular las dos últimas, podrían ser optimizadas de forma exhaustiva con el objetivo de obtener mejores resultados. Por ejemplo, en la etapa de modelado del individuo se podría llevar a cabo un análisis exhaustivo de técnicas de optimización para ver cuál de ellas obtiene un mejor ajuste a los comportamientos observados. O, en la etapa de aplicación de técnicas de aprendizaje automático podría realizarse un estudio completo de gran cantidad de técnicas y distintas configuraciones de parámetros para mejorar los resultados, por ejemplo, en términos de clasificación. Esta optimización no se ha llevado a cabo en este trabajo de tesis debido a que el objetivo es presentar una metodología de carácter general. La optimización de cada una de las etapas depende del problema tratado y, por tanto, ha de ser abordada al enfrentarse a cada uno de los problemas de diagnóstico en particular. Uno de los objetivos de este trabajo de tesis consiste en presentar de forma general la metodología de ayuda a la caracterización y al diagnóstico y demostrar su utilidad al aplicarse a distintos trastornos. Como se mostrará, los resultados obtenidos ponen de manifiesto la utilidad de la metodología y demuestran las hipótesis iniciales planteadas en este trabajo. Por otra parte, la obtención de los resultados óptimos en términos, por ejemplo, de ayuda al diagnóstico, queda fuera de los objetivos de este trabajo de tesis puesto que el uso de una técnica u otra para la obtención de esos resultados depende del problema concreto al que se pretenda aplicar la metodología en cada momento.

5.2.1. Detección de diferencias a nivel conductual

La primera etapa de la metodología consiste en encontrar una tarea o conjunto de tareas en la que los pacientes presenten diferencias significativas a nivel conductual con respecto a un grupo de individuos sanos. Una primera pregunta que surge es si estas diferencias a nivel conductual podrían ser suficientes para emitir un diagnóstico correcto. Como vimos en el capítulo 1, las condiciones de heterogeneidad y solapamiento que caracterizan a una gran cantidad de trastornos cognitivos hacen que la respuesta a esa pregunta sea no. Esto hace que el uso exclusivo de información conductual sea uno de los principales problemas de los métodos actuales de diagnóstico y caracterización. Para entender mejor esta dificultad se puede pensar en un caso común como la gripe y uno de sus síntomas más homogéneos: la fiebre. Si se toma un grupo de pacientes con gripe, se observará que existe una diferencia significativa en su temperatura corporal con respecto a un grupo de individuos sanos. Sin embargo, este hecho no es suficiente como para diagnosticar una gripe puesto que la fiebre se da también en muchas otras enfermedades similares, es decir, todas esas enfermedades se solapan en cuanto a ese síntoma. Por otra parte, es fácil ver que la ausencia de esas

condiciones de heterogeneidad y solapamiento facilitan enormemente el diagnóstico. Véase por ejemplo el caso del sarampión. Las manchas de color rojo en la piel se manifiestan de una forma homogénea en todos los pacientes afectados por el sarampión y, además, existe un síntoma inequívoco, en otras palabras, síntoma que no se da en ninguna otra enfermedad, las *Manchas de Koplik* (manchas blanquecinas en el centro de las mucosas bucales). En estas condiciones, el diagnóstico del sarampión es tremendamente fácil. El problema es que esas condiciones de homogeneidad en los individuos afectados y existencia de síntomas inequívocos, es decir, bajo solapamiento, son muy difíciles de encontrar en los trastornos cognitivos y, por tanto, el uso únicamente de diferencias a nivel conductual dificulta enormemente el diagnóstico de estos trastornos.

Por último, en esta etapa de la metodología es importante tener en cuenta a la hora de seleccionar la tarea o grupo de tareas a estudiar que en una siguiente etapa se pretende construir un modelo computacional cognitivo de esas tareas. De este modo, no solo hay que tener en cuenta la existencia de diferencias a nivel conductual sino también las limitaciones de las técnicas de modelado y la facilidad de modelado de una u otra tarea.

5.2.2. Modelado computacional cognitivo

La segunda etapa de la metodología consiste en la construcción de un modelo computacional cognitivo para la tarea o tareas seleccionadas en la etapa anterior. Con el objetivo de que el modelo tenga utilidad en las tareas de caracterización y diagnóstico ha de cumplir cuatro requisitos fundamentales:

- *Ajuste a los datos*: El modelo computacional cognitivo ha de tratar de reflejar, en mayor o menor medida, los datos recogidos empíricamente. Dado que se quiere aplicar a la ayuda al diagnóstico, ha de ser capaz de reproducir los patrones de comportamiento observados tanto en pacientes afectados por la enfermedad como en individuos sanos.
- *Flexibilidad*: Para poder reflejar el amplio abanico de comportamientos mostrados tanto por los pacientes como por los individuos de control, el modelo ha de ser lo suficientemente flexible como para adecuar sus parámetros para producir esos perfiles de comportamiento. Además, sería interesante que el modelo fuese capaz de dar cabida a las distintas teorías que tratan de explicar el trastorno estudiado con el fin de poder comprobar las predicciones de cada una de ellas y así, contribuir a desentrañar las causas del trastorno estudiado.
- *Plausibilidad psicológica*: Para que la información obtenida a través del modelo sea

útil es importante centrarse no sólo en *qué* comportamiento produce el modelo sino en *cómo* lo produce. Los mecanismos y procesos propuestos han de ser consistentes con los que se sabe que existen en relación al fenómeno estudiado y a otros fenómenos cognitivos relacionados. En otras palabras, el modelo no sólo ha de tratar de reproducir los perfiles de comportamiento observados sino también los mecanismos que dan lugar a esos perfiles de comportamiento.

- *Inteligibilidad*: Por último, los mecanismos que dan lugar al comportamiento del modelo han de ser fácilmente comprensibles. Un modelo capaz de ajustarse perfectamente a los datos observados carece de valor si sus mecanismos internos no quedan claros. La utilidad de ese modelo sería prácticamente nula puesto que sería difícil aclarar las causas que provocan ese comportamiento o tratar de caracterizarlo.

En este trabajo de tesis se propone el uso de la arquitectura cognitiva ACT-R puesto que cumple los requisitos señalados de flexibilidad, plausibilidad psicológica e inteligibilidad. La flexibilidad de ACT-R viene dada por los mas de 60 parámetros libres que posee la arquitectura. Esta libertad permite que todos los mecanismos y estructuras puedan adecuarse tanto a comportamientos normales como comportamientos deficitarios. Su plausibilidad psicológica está avalada por la gran cantidad de modelos existentes para infinidad de tareas cognitivas muy distintas entre sí. Por último, la inteligibilidad de la arquitectura es innegable puesto que todos sus componentes tienen una interpretación a nivel biológico muy clara [Anderson, 2007]. Por tanto, ACT-R proporciona un marco en el que desarrollar modelos con estos requisitos para gran cantidad de tareas posibilitando la generalidad de la metodología. Por otra parte, como se comentó en el capítulo 2, en este trabajo se trata de dar una implementación del modelo declarativo / procedural cuyas propuestas radican en la separación física y funcional de las memorias declarativa y procedural. ACT-R plantea esa misma separación como parte fundamental de su arquitectura y, por tanto, constituye un marco perfecto para la implementación del modelo DP.

5.2.3. Individualización de los parámetros del modelo

Como ya se ha comentado, la heterogeneidad de muchos trastornos cognitivos dificulta tanto la caracterización general del trastorno como el diagnóstico individualizado. Es necesario que la metodología se centre en las peculiaridades de cada individuo en lugar de tratar de estudiar el comportamiento promedio. Esta etapa de la metodología propone encontrar, para cada sujeto estudiado, la combinación de parámetros adecuada para producir el comportamiento de dicho sujeto. Esta información será usada en la etapa posterior para encontrar las diferencias generales entre los grupos de individuos sanos y afectados por el trastorno y utilizarlas para la ayuda al diagnóstico y la caracterización.

La búsqueda de la combinación de parámetros adecuada para ajustarse a un comportamiento dado ha de combinar el conocimiento teórico del problema y el uso de técnicas de optimización. En primer lugar, hay que definir el espacio de búsqueda. En otras palabras, hay que seleccionar los parámetros que van a ser objeto de estudio y hay que acotar, sus posibles valores. La selección de los parámetros relevantes depende de varios factores como la tarea modelada o las hipótesis que se quieran comprobar. La restricción de los valores de los parámetros seleccionados es un paso necesario para mantener la plausibilidad psicológica del modelo. Una de las principales críticas a los modelos basados en ACT-R, que es extensible a cualquier modelo con un gran número de parámetros libres, es que se puede producir cualquier comportamiento con una combinación adecuada de parámetros, aunque ésta no sea psicológicamente plausible. Una buena forma de mantener la plausibilidad psicológica de esos parámetros y, por extensión, del modelo es usar valores próximos a los valores medios utilizados previamente en otros trabajos similares para distintas tareas cognitivas. En este trabajo, dado que se usa un modelo ACT-R, se propone el uso de la base de datos compilada por Wong et al. [2010]. En ella se recogen los valores medios y desviaciones típicas de los parámetros de ACT-R utilizados en un conjunto representativo de modelos ACT-R de tareas muy variadas. Una primera opción sería limitar los valores de los parámetros por los márgenes dados por el valor medio y su desviación típica. Eso sería adecuado para modelar el comportamiento de individuos con capacidades cognitivas intactas, dado que los trabajos recogidos en la base de datos de Wong et al. [2010] se refieren a individuos sanos. Sin embargo, algunos autores apuntan que algunos trastornos reflejan simplemente la cola de la distribución normal de determinadas capacidades cognitivas [Thomas y Karmiloff-Smith, 2003]. Por ejemplo, los criterios ICD-10 de la Organización Mundial de la Salud para el TEL [World Health Organization, 1993] indican que un individuo diagnosticado con TEL ha de puntuar en alguna las medidas de utilizadas para su diagnóstico más allá de 2 desviaciones estándar del valor medio. Sin embargo, se reconoce que el umbral de 2 desviaciones estándar es arbitrario. Por tanto, parece adecuado ampliar ese margen para recoger un mayor rango de variabilidad de la distribución normal. En concreto, en este trabajo se propone utilizar los márgenes dados por la media más-menos 5 desviaciones típicas. Con este valor se cubre más del 98 % de la distribución normal, valor que es suficientemente amplio para abarcar los comportamientos anómalos sin ampliar de forma desmesurada el espacio de búsqueda.

Una vez definido el espacio de búsqueda es necesario encontrar la técnica de optimización más adecuada para ese espacio. El espacio de búsqueda definido por los parámetros de ACT-R ha sido muy poco investigado [Tor y Ritter, 2004] y por lo tanto, se desconoce su complejidad. Sin embargo, en cada proceso cognitivo intervienen gran cantidad de

variables y mecanismos que interactúan de múltiples formas para dar lugar a un sistema complejo. Por tanto, cabe esperar que el espacio de búsqueda definido por los parámetros de ACT-R sea muy complejo. Una técnica particularmente adecuada para problemas multidimensionales en espacios de búsqueda complejos y con numerosos óptimos locales son los algoritmos genéticos. Los algoritmos genéticos han sido utilizados con éxito en gran cantidad de problemas de distintas disciplinas y, en particular, en el ámbito de la optimización de modelos computacionales cognitivos [Tor y Ritter, 2004; Iglesias, 2013; Oliva et al., 2013]. La principal ventaja de los algoritmos genéticos es su habilidad para evitar óptimos locales mientras que su principal inconveniente es su elevado coste computacional [Jong, 2006]. Sin embargo, el coste computacional no es un factor demasiado importante en el caso que nos ocupa puesto que los trastornos cognitivos son trastornos de largo recorrido y el hecho de dedicar tiempo, incluso días, a dar un diagnóstico no implica un cambio significativo en los efectos de los tratamientos y terapias.

Los algoritmos genéticos [Jong, 2006; Araujo y Cervigón, 2009] son un conjunto de técnicas de optimización basados en la evolución natural: sólo sobreviven, y por tanto hacen que su información genética perdure, aquellos individuos que mejor se adaptan al medio. Cada uno de los individuos con los que opera un algoritmo genético es una posible solución al problema en cuestión. En este trabajo, cada individuo está representado por el conjunto de valores de los parámetros elegidos al definir el espacio de búsqueda. El grado de adaptación al medio es una medida de la bondad de cada una de esas soluciones. Así, la información de las mejores soluciones es la que se mantiene entre las distintas iteraciones del algoritmo, también llamadas generaciones. Los algoritmos genéticos actúan sobre una población mediante una serie de operadores. Los operadores que modifican los individuos a lo largo de la ejecución del algoritmo son los operadores de *cruce*, *mutación* y *selección de individuos*. El operador de cruce simula los mecanismos de reproducción naturales permitiendo que los individuos intercambien información genética para dar lugar a un nuevo individuo. El operador de mutación permite modificar aleatoriamente algunos genes y el operador de selección de individuos trata de imitar los procesos de selección natural: aquellos individuos con un peor comportamiento, es decir, una mala adaptación, son descartados de modo que sólo se mantienen en la siguiente generación los mejor adaptados. El operador de selección requiere una medida del grado de adaptación de los distintos individuos. Esta medida suele llamarse *función de ajuste* y es un elemento clave que ha de ser definido en función del problema. Una vez que los operadores de cruce, mutación y selección han sido aplicados, se genera una nueva generación de individuos, en teoría mejor adaptados y, por tanto, más próximos a la solución del problema. Este proceso se repite hasta que se alcanza un criterio de parada, que puede ser un número máximo de

generaciones o un valor de ajuste por debajo de un umbral dado. Dentro de este esquema general existen numerosas variaciones dependiendo del tipo de representación de los individuos, los tipos de operadores utilizados, los tamaños de la población o la condición de parada. En este trabajo se usará un tipo de algoritmo genético que usa una representación continua de los genes de cada individuo: las estrategias evolutivas. Esta representación es la más adecuada dado que los parámetros de ACT-R son muy sensibles a pequeñas variaciones que podrían no ser capturadas por codificaciones binarias. Además, las estrategias evolutivas han sido utilizadas con éxito en tareas similares [Iglesias, 2013; Oliva et al., 2013].

5.2.3.1. Estrategias evolutivas

Las estrategias evolutivas [Beyer y Schwefel, 2002] son un tipo de algoritmo genético que usa una representación de los individuos en forma de vectores de números reales. El objetivo es encontrar el óptimo global, máximo o mínimo dependiendo del problema, de una función de ajuste n -dimensional donde n es el número de parámetros o, en términos evolutivos, el número de genes de cada individuo. Además, las estrategias evolutivas hacen uso de un conjunto de parámetros endógenos σ_i que controlan su comportamiento, en particular, el del operador de mutación. El conjunto de parámetros endógenos está formado por un vector de n elementos asociado a cada uno de los individuos. Así, cada individuo viene dado por un vector de $2n$ elementos:

$$\underbrace{x_1, \dots, x_n}_{\text{genes}} \quad \underbrace{\sigma_1, \dots, \sigma_n}_{\text{parámetros endógenos}} \quad (5.5)$$

El valor de los parámetros endógenos evoluciona con el algoritmo al igual que los genes para adaptar su comportamiento. Esta adaptación viene dada por el parámetro τ , conocido también como parámetro de aprendizaje. A partir de esta representación, se definen los tres operadores principales de un algoritmo genético, que están controlados por dos parámetros principales denominados junto con el parámetro τ parámetros exógenos. El parámetro μ define el número de individuos que forman cada generación y el parámetro λ define el número de descendientes que son generados a partir del cruce de los individuos de una generación. A diferencia de los parámetros endógenos, sus valores no varían a lo largo de la evolución. A continuación se comentan brevemente los distintos operadores que pueden usarse con las estrategias evolutivas. Un repaso exhaustivo puede verse en Beyer y Schwefel [2002].

Cruce El operador de cruce produce un descendiente a partir de ρ padres seleccionados entre los individuos de la población. Por tanto, para generar los λ descendientes hay que aplicar el operador λ veces. Existen dos tipos principales de cruce:

- Cruce discreto: El gen i -ésimo del descendiente se selecciona aleatoriamente de entre los genes i -ésimos de los padres.
- Cruce intermedio: El gen i -ésimo del descendiente se calcula como la media de los valores de los genes i -ésimos de los padres.

En las estrategias evolutivas es típico utilizar los dos tipos de cruce: cruce discreto para los genes y cruce intermedio para los parámetros endógenos.

Mutación El operador de mutación modifica de forma aleatoria algunos de los genes de cada individuo. En el caso de las estrategias evolutivas, el operador de mutación está basado en una distribución Gaussiana. El individuo mutado se obtiene añadiendo un valor aleatorio, dependiente de los parámetros endógenos, a cada uno de los genes. Existen distintos tipos de mutación:

- Mutación no correlacionada con tamaño de paso único: Cada individuo contiene un único parámetro endógeno que se utiliza y es mutado de la siguiente forma:

$$\sigma' = \sigma \cdot e^{N(0,\tau)} \quad (5.6)$$

$$x'_i = x_i + N_i(0, \sigma') \quad (5.7)$$

- Mutación no correlacionada de n tamaños de paso: Cada individuo tiene n parámetros endógenos que se utilizan y son mutados de la siguiente forma:

$$\sigma'_i = \sigma_i \cdot e^{N(0,\tau') + N_i(0,\tau)} \quad (5.8)$$

$$x' = x + (N_1(0, \sigma'_1), \dots, N_n(0, \sigma'_n)) \quad (5.9)$$

donde x son los genes del individuo inicial, x' son los genes del individuo mutado, σ son los parámetros endógenos iniciales, σ' son los parámetros endógenos mutados y N_i son números aleatorios generados a partir de una distribución normal.

- Mutación no correlacionada: La mutación es similar a las anteriores pero se utiliza una matriz de covarianza para permitir una rotación en el espacio de búsqueda.

Selección de individuos El operador de selección elige para formar parte de la siguiente generación a los μ individuos mejor adaptados. Para ello evalúa la función de ajuste para cada individuo y selecciona aquellos que obtienen un mejor valor. Existen dos tipos de selección según se tenga en cuenta a los padres o no:

- Selección (μ, λ) : Este tipo de selección elige a los μ individuos de la siguiente generación a partir únicamente de los descendientes. Es decir, los padres no se mantienen de una generación a otra.
- Selección $(\mu + \lambda)$: Este tipo de selección elige a los μ individuos de la siguiente generación teniendo en cuenta tanto a los padres como a los descendientes.

En resumen, las estrategias evolutivas parten de una población inicial de μ individuos formados cada uno de ellos por un vector de n genes y n parámetros endógenos. A partir de esa población inicial se generan λ descendientes mediante el operador de cruce. A continuación, esos descendientes sufren mutaciones (controladas por los n parámetros endógenos) y finalmente se seleccionan μ individuos teniendo en cuenta el grado de adaptación al medio de cada uno de ellos mediante la función de ajuste. De este modo se produce una nueva generación sobre la que se aplican los mismos pasos hasta alcanzar la condición de parada.

5.2.4. Aplicación de técnicas de aprendizaje automático

Numerosos trabajos en el campo de la ayuda al diagnóstico que aplican distintas técnicas avanzadas de aprendizaje automático obtienen mejores resultados que aquellos que usan las técnicas estadísticas clásicas [Stylios et al., 2008; Lehmann et al., 2007; Prud'hommeaux y Rouhizadeh, 2012]. Por tanto, se decidió aplicar varias de esas técnicas a partir de la información obtenida por el modelo computacional cognitivo y comparar los resultados con técnicas clásicas como el análisis discriminante lineal. De este modo, se puede comprobar que no sólo es importante el tipo de información en la que se centra la metodología sino también el tipo de técnicas con las que se procesa y analiza esa información. Sin embargo, los objetivos de esta etapa de la metodología van más allá y tratan de comprobar tres subhipótesis que pueden derivarse de la hipótesis principal de este trabajo de tesis de tesis:

- Las variables obtenidas a partir del modelado computacional cognitivo poseen una capacidad informativa y discriminatoria mayor que la de las variables conductuales.
- El uso de técnicas avanzadas de clasificación a partir de la información obtenida a través del modelado computacional cognitivo permite obtener mejores resultados en términos de ayuda al diagnóstico.

- El uso de técnicas de agrupamiento a partir de la información obtenida a través del modelado computacional cognitivo permite obtener mejores resultados en términos de caracterización y puede ser útil para apoyar o refutar distintas teorías sobre las causas del trastorno estudiado.

Para ello, se utilizan distintas técnicas de aprendizaje automático que usan la información obtenida a través de las variables conductuales observadas en la primera etapa de la metodología y la información obtenida a través de los parámetros internos del modelo computacional cognitivo obtenidos en las etapas 2 y 3. A partir de estas dos fuentes de información se generarán tres subconjuntos de variables que serán utilizados con las distintas técnicas aplicadas en esta etapa:

Subconjunto de variables observables. Este subconjunto está formado por las variables observadas en el estudio realizado en la primera etapa de la metodología.

Subconjunto de variables internas. Este subconjunto está formado por los parámetros del modelo definidos en la segunda etapa de la metodología y cuyos valores individuales se obtienen en la tercera etapa.

Conjunto completo. Este conjunto es la unión de los dos anteriores y por tanto incluye información conductual e interna.

A continuación se comentan los tres tipos de técnicas utilizadas para conseguir cada uno de los tres objetivos apuntados: técnicas de selección de atributos, técnicas de clasificación y técnicas de agrupamiento. Para cada uno de estos tres tipos se explica el objetivo de cada una de ellas y se comentan brevemente las técnicas utilizadas. No se entrará en detalle en ninguna de ellas puesto que todas son técnicas ampliamente conocidas en el ámbito de la IA. Por supuesto, en cada uno de los apartados se podrían haber utilizado otras técnicas similares. Las técnicas aplicadas han sido elegidas por ser unas de las más significativas de cada uno de los tipos pero la metodología propuesta podría ser utilizada con cualquiera de las muchas opciones disponibles.

5.2.4.1. Ponderación de atributos

Una de las principales propuestas de esta tesis es que la información extraída a partir del modelado computacional cognitivo puede ser más informativa que la de las variables conductuales. Para comprobar esta hipótesis se proponen técnicas de ponderación de atributos que dan una aproximación de la capacidad informativa y discriminatoria de las

distintas variables y grupos de variables utilizados con respecto a la etiqueta de diagnóstico utilizada. Las técnicas de ponderación de atributos se enmarcan dentro de las técnicas de selección de atributos. Existen dos tipos principales de técnicas de selección de atributos: las técnicas de selección de atributos propiamente dichas, que exploran el espacio de subconjuntos de atributos en búsqueda del mejor, y las técnicas de ordenación de atributos que ordenan la lista de atributos en función de distintos criterios. A su vez, estos dos tipos de técnicas pueden dividirse en técnicas basadas en filtros y técnicas basadas en modelos. Las primeras se basan en técnicas estadísticas como medidas de información, medidas de dependencia o de correlación para ordenar o seleccionar los atributos. Las segundas utilizan un modelo para evaluar la calidad de los distintos subconjuntos de atributos utilizados. En este trabajo de tesis no se busca seleccionar el subconjunto de atributos óptimo sino comprobar la importancia relativa de cada uno de los atributos y de los dos grupos de atributos utilizados. Por tanto, sólo se utilizarán técnicas de ordenación de atributos basadas en filtro y modelos.

Tabla 5.1: Técnicas de ponderación de atributos utilizadas.

Filtro	Ganancia de Información
	Correlación
	Estadístico Chi cuadrado
Modelo	Ponderación por reglas
	Ponderación por SVM

Las técnicas de selección de atributos propuestas pueden verse en la tabla 5.1. Los detalles de cada una de ellas pueden encontrarse en Guyon y Elisseeff [2002]. Como se ha señalado, podrían usarse otras técnicas pero se han seleccionado estas por ser una muestra representativa de las técnicas de selección de atributos usadas habitualmente.

5.2.4.2. Clasificación

El objetivo de esta fase de la última etapa de la metodología es demostrar que no sólo el tipo de información utilizado es muy importante en la ayuda al diagnóstico de trastornos cognitivos sino también el tipo de técnicas utilizadas para el procesamiento de esa información. Por ejemplo, si se trata de usar un clasificador lineal para resolver un problema no separable linealmente, independientemente de la información utilizada, el resultado será siempre mejorable. Como han demostrado trabajos anteriores sobre ayuda al diagnóstico de trastornos cognitivos [Stylios et al., 2008; Lehmann et al., 2007; Prud'hommeaux y Rouhizadeh, 2012], el uso de técnicas avanzadas de aprendizaje au-

tomático ha supuesto en muchos casos una mejora significativa con respecto a las técnicas de análisis clásicas. Por lo tanto, se decidió incluir un estudio comparativo similar en este trabajo de tesis. Para ello se utilizarán cinco técnicas ampliamente conocidas que suponen una muestra representativa de las técnicas más utilizadas habitualmente. A continuación se explican brevemente cada una de ellas comentando sus características principales y las ventajas e inconvenientes de cada una.

Análisis discriminante lineal (LDA) El análisis discriminante lineal de Fisher [Mitchell, 1997] trata de encontrar la combinación lineal de las variables del problema que consiguen maximizar la diferencia entre las medias de cada clase con respecto a la varianza de los elementos pertenecientes a cada clase, obteniendo, por tanto, el menor solapamiento posible entre las clases. Esta técnica estadística ha sido ampliamente utilizada en combinación con distintos tests neuropsicológicos para comprobar la capacidad discriminante de los mismos. Dado que el objetivo de este trabajo de tesis es mostrar que la metodología propuesta mejora los métodos tradicionales de diagnóstico, se usará este método como método de referencia para comparar con los resultados obtenidos por los métodos más sofisticados de aprendizaje automático que se explican a continuación.

Máquinas de vector de soporte (SVM) Las máquinas de vector de soporte [Cortes y Vapnik, 1995] tratan de encontrar el hiperplano que maximiza el margen entre las dos posibles clases. Es decir, tratan de encontrar la superficie que dista más de los puntos más cercanos de cada clase. El algoritmo original daba lugar a un clasificador lineal. Sin embargo, modificaciones posteriores permiten trabajar con conjuntos de datos no separables linealmente. Entre ellas destaca el uso de las llamadas *funciones núcleo* (*kernel functions*), que realizan una transformación no lineal del espacio de atributos a un espacio de mayor dimensionalidad donde sí es posible realizar una separación lineal. La principal ventaja de estos modelos es su eficiencia, siendo muy adecuados en problemas de alta dimensionalidad. Sin embargo, la elección de una función núcleo adecuada es un aspecto clave que puede condicionar enormemente el comportamiento de esta técnica y, además, el uso de funciones núcleo reduce la inteligibilidad de estos métodos puesto que los resultados se expresan en función de los atributos transformados.

Naïve Bayes (NB) El método Naïve Bayes [Mitchell, 1997] es un modelo de clasificación con redes bayesianas basado en la suposición de que todas las variables son estadísticamente independientes dada la clase a la que pertenecen. Como las anteriores, esta técnica es también muy eficiente y es muy robusta frente al ruido en las muestras. Sin embargo, suele necesitar gran cantidad de muestras para estimar las probabilidades correctamente.

A pesar de la simplicidad del modelo y de que la suposición básica es bastante fuerte, estos métodos obtienen resultados igual de buenos, e incluso mejores, que otros clasificadores más sofisticados [Michie et al., 1994].

Redes Neuronales (NN) Las redes neuronales [Mitchell, 1997] tratan de emular el comportamiento de los procesadores biológicos de la información, las neuronas. Sus características son similares a las de los métodos conexionistas comentados en el capítulo 2. Están basados en una arquitectura reticular formada por nodos y conexiones que tienen asociado un *peso*. Cada nodo propaga una señal hacia los nodos a los que está conectado y esa señal es modulada por el peso de la conexión. La retropropagación es el algoritmo básico de aprendizaje. Para cada uno de los ejemplos del conjunto de entrenamiento, se mide la diferencia entre la salida producida por la red y la salida correcta. Esa diferencia se propaga hacia los nodos de las capas anteriores, ajustando el valor de los pesos de cada una de las conexiones. La principal ventaja de este método es que, cuando están bien ajustadas, tarea que en la mayoría de los casos no es trivial, su comportamiento suele ser muy bueno. Entre sus inconvenientes destacan que requieren un conjunto de entrenamiento muy bien caracterizado, son sensibles al ruido y poco robustas. Además, su inteligibilidad suele ser baja. A pesar de que existen algunos algoritmos que permiten extraer reglas a partir de los pesos de las conexiones, los modelos obtenidos suelen ser utilizados como cajas negras de las que es difícil obtener alguna explicación de la salida obtenida.

Árboles de decisión (DT) Los árboles de decisión [Mitchell, 1997] son estructuras jerárquicas en las que cada uno de los nodos internos representa un atributo y cada una de las ramas una condición sobre el valor de ese atributo. Así, para cada ejemplo se obtiene su clase recorriendo el árbol desde la raíz y siguiendo las ramas de las condiciones adecuadas al ejemplo en cuestión. Su principal ventaja es su elevada inteligibilidad al poder expresarse en forma de reglas. No son sensibles al ruido ni a los atributos no significativos. Sin embargo, en algunos problemas son muy sensibles al sobreajuste.

5.2.4.3. Agrupamiento

Las técnicas de agrupamiento permiten encontrar grupos en un conjunto de casos a partir de la distancia entre ellos según distintos criterios. Estas técnicas pueden tener aplicaciones muy interesantes en el ámbito de la caracterización de trastornos cognitivos. La elevada heterogeneidad que presentan muchos de estos trastornos ha llevado a proponer subgrupos dentro de un mismo trastorno (como se vio, por ejemplo, en el caso del TEL [Bishop, 2000; Gopnik y Crago, 1991]). De ahí que el uso de técnicas de agrupamiento

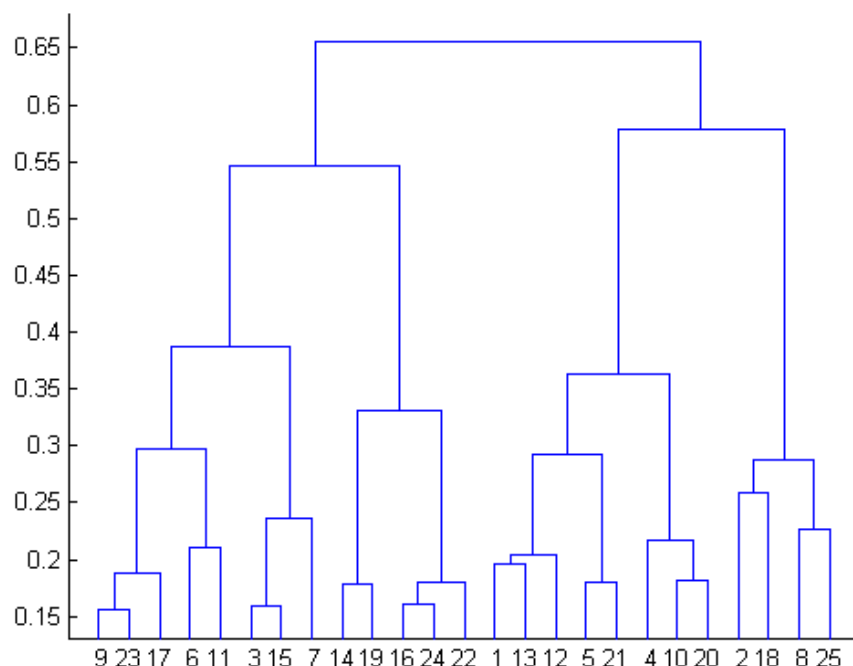


Figura 5.4: Ejemplo de dendrograma

tenga una doble utilidad: en primer lugar, comprobar si es posible detectar esos subgrupos utilizando la información derivada del modelo computacional cognitivo y, en segundo lugar, caracterizar las causas subyacentes para cada uno de los subgrupos (si los hay) y, por tanto, apoyar o refutar las teorías existentes sobre dichas causas. En este trabajo se propone el uso de dos técnicas: agrupamiento jerárquico y k-medias.

Agrupamiento jerárquico Los métodos de agrupamiento jerárquico construyen un árbol a partir de los casos observados. Las hojas del árbol son cada uno de los casos y los nodos internos son grupos de casos cercanos. La altura de las ramas indica la distancia entre los miembros de un grupo. Este árbol se denomina dendrograma. La figura 5.4 muestra un ejemplo. Los dendrogramas permiten distintos agrupamientos dependiendo del nivel de cohesión y diferenciación que se quiera para los grupos. La elección de los grupos puede depender del problema tratado pero, en general, es conveniente obtener el menor número de grupos posible con una gran diferenciación entre ellos (es decir, con la mayor distancia posible entre ellos) y con una alta cohesión (es decir, con la menor distancia posible entre los miembros de un mismo grupo). En el ejemplo de la figura 5.4 se observan cuatro grupos

bien diferenciados: {9 - ... - 7}, {14 - ... - 22}, {1 - ... - 20} y {2 - ... - 25}. En este trabajo se usará el agrupamiento jerárquico con la intención de comprobar si la heterogeneidad existente a nivel conductual se mantiene en el nivel interno dado por los parámetros del modelo. En otras palabras, se tratará de identificar varios subgrupos dentro del TEL y ver si existe un subgrupo dominante. Por ejemplo, en el caso del TEL, algunos autores han señalado algunos subgrupos a nivel conductual. Sin embargo, tanto su definición como las causas que provocan cada uno de esos perfiles siguen sin estar muy claras. Por tanto, la capacidad de detectar y definir de forma más clara estos grupos sería de gran utilidad en términos de caracterización del trastorno.

K-medias El algoritmo K-medias es un método de agrupamiento que parte de un número de grupos conocidos a priori y trata de asignar todos los casos a alguno de esos grupos en función de la distancia a los centroides de cada grupo (elementos que representan el valor medio de los atributos de cada grupo). El resultado de este algoritmo depende del número de grupos indicados a priori. Por tanto, en este trabajo de tesis se propone utilizar en primer lugar el agrupamiento jerárquico (que no necesita esa información) y utilizar el número de grupos obtenidos mediante ese método como entrada para el algoritmo K-medias. En este trabajo, esta técnica será utilizada para obtener una caracterización más precisa de los grupos encontrados mediante el agrupamiento jerárquico. La obtención de los valores medios de los parámetros de cada grupo permite refinar las posibles causas que provocan cada uno de los perfiles y, por otra parte, apoyar o refutar algunas de las teorías existentes en torno al trastorno estudiado.

Caracterización del Trastorno Específico del Lenguaje

- *¡Hasta un niño de cinco años sería capaz de entender esto!*
- *¡Rápido! Busque a un niño de cinco años.*

Groucho Marx, *Sopa de ganso*.

En este capítulo se muestra la aplicación de la metodología presentada en el capítulo 5 al caso particular del Trastorno Específico del Lenguaje (TEL). El objetivo es demostrar la validez de la metodología como ayuda al diagnóstico y a la caracterización de trastornos cognitivos, en particular, de trastornos del lenguaje. La sección 6.1 se centra en la caracterización y diagnóstico del TEL. En primer lugar se hace un repaso de las teorías que tratan de explicar sus causas y a continuación se comentan los métodos utilizados a día de hoy para su diagnóstico. En la sección 6.2 se resumen las motivaciones y objetivos generales, ya comentados, que han llevado a estudiar el TEL en este trabajo de tesis. A partir de ahí, cada una de las cuatro secciones explica cómo se han aplicado cada uno de los cuatro pasos de la metodología propuesta. En la sección 6.3 se comentan los resultados del estudio empírico utilizado como referencia. A continuación, las secciones 6.4, 6.5 y 6.6 explican, respectivamente, la tarea de modelado de esos resultados, la individualización de los parámetros del modelo y los resultados en términos de caracterización y capacidad de ayuda al diagnóstico. Por último, la sección 6.7, discute los resultados obtenidos.

6.1. El Trastorno Específico del Lenguaje

El Trastorno Específico del Lenguaje (TEL) se define habitualmente como un trastorno del desarrollo en la capacidad de lenguaje que se da en ausencia de otros factores que suelen concurrir con otros problemas en la adquisición del lenguaje (como retraso mental, trastornos en el procesamiento auditivo o daño neuronal) [Leonard, 1998]. La prevalencia (proporción de individuos que padecen una determinada enfermedad en un determinado momento) del TEL se sitúa en torno al 7,4% [Tomblin et al., 1997], afectando en mayor medida a hombres que a mujeres (en torno a tres veces más). El TEL afecta a todos los aspectos del uso y la adquisición del lenguaje: la fonología, la morfología, la sintaxis, la semántica y la pragmática se ven afectadas de un modo u otro.

Numerosos estudios han investigado el perfil cognitivo de los niños con TEL. Estos estudios suelen utilizar distintas tareas lingüísticas y no lingüísticas para comparar el comportamiento de los niños con TEL y los niños sanos. A continuación se presenta un breve resumen de las conclusiones de esos estudios. Un repaso exhaustivo de los estudios en el ámbito lingüístico y extralingüístico puede encontrarse en Leonard [1998] y Ullman y Pierpont [2005] respectivamente.

- **Fonología:** Los niños y adultos afectados por el TEL muestran problemas relacionados con el procesamiento fonológico. Por ejemplo, se observan problemas en la discriminación de fonemas [Bird et al., 1995] o en la capacidad de repetición palabras reales e inventadas [Gathercole y Baddeley, 1990; Botting y Conti-Ramsden, 2001]. Este hecho ha llevado a algunos autores a proponer estos problemas en el sistema fonológico o en la memoria de trabajo fonológica como principales causas del TEL [Gathercole y Baddeley, 1990, 1993]. Sin embargo, es importante resaltar que no afectan a todas las formas por igual. Las formas más susceptibles de ser memorizadas (es decir, las más frecuentes) no presentan estos problemas [Ullman y Pierpont, 2005].
- **Morfología:** Tradicionalmente, el TEL ha sido asociado a trastornos en el procesamiento y producción de la morfología, hasta el punto que en numerosas ocasiones ha sido considerado como un marcador clave de este trastorno. En los niños con TEL se ven afectadas tanto la morfología derivativa [Gopnik y Crago, 1991], relacionada con aquellos morfemas que modifican el significado del lexema (por ejemplo el prefijo *in-* indica negación del significado del lexema *creíble* - *increíble*), como la morfología flexiva [Ullman y Gopnik, 1999; van der Lely y Ullman, 2001], relacionada con los morfemas que añaden ciertas características gramaticales al lexema sin modificar su

significado (por ejemplo, el sufijo *-ábamos*, añadido a un verbo de la primera conjugación, indica primera persona, número plural, tiempo pretérito, aspecto imperfectivo y modo indicativo). Esta última ha sido objeto de gran cantidad de estudios y es en la que se centra este trabajo de tesis. En particular, los errores de omisión del sufijo y la morfología regular han centrado la mayor parte del interés. Los niños con TEL omiten los sufijos verbales en mayor medida que los niños normales. Por su parte, el estudio de la morfología regular mostró que los niños con TEL cometen más errores que los niños normales al conjugar formas regulares y que producen muchos menos errores de sobrerregularización [Ullman y Gopnik, 1999; van der Lely y Ullman, 2001]. Algunos autores han interpretado estos hechos como muestras de que la causa del TEL reside en un déficit puramente gramatical [Rice et al., 1995].

- **Sintaxis:** Los niños con TEL muestran problemas relacionados con la sintaxis tanto en la comprensión como en la producción del lenguaje. En cuanto a la comprensión, los niños muestran graves problemas para entender estructuras complejas como por ejemplo las oraciones pasivas [Dick et al., 2004]. En la producción muestran problemas para formar esas mismas estructuras complejas, por ejemplo las preguntas en inglés [Van Der Lely y Battell, 2003]. Incluso muestran problemas en estructuras sintácticas simples confundiendo el orden de palabras [Hansson y Nettelbladt, 1995]. Al igual que en el caso de la morfología, se observa la dependencia en la producción de construcciones sintácticas de alta frecuencia, presumiblemente porque pueden ser más fácilmente memorizadas [Thordardottir y Weismer, 2002].
- **Semántica:** En el ámbito léxico semántico, a los niños con TEL se les atribuye un vocabulario limitado. En particular presentan significados muy limitados [Dockrell et al., 2003] y problemas relacionados con la adquisición de nuevos términos [Brackenbury y Pye, 2005].
- **Pragmática:** Este ámbito apenas ha sido estudiado. Sin embargo, algunos autores sugieren también algún tipo de dificultad relacionada con la pragmática como la de intervenir de forma normal en conversaciones [Craig, 1993]

Por otra parte, a pesar de lo que apuntaban las primeras teorías sobre el TEL, este trastorno no se reduce únicamente al lenguaje. Hay muchas otras funciones cognitivas dañadas. Los niños con TEL han mostrado dificultades en distintas tareas motoras [Hill, 2001], trastornos en la memoria de trabajo [Montgomery, 2003] y problemas en el procesamiento temporal [Leonard, 1998]. Así pues, el perfil del TEL se caracteriza por afectar a un amplio abanico de áreas muy distintas provocando su solapamiento con gran cantidad de trastornos. Por otra parte, estos hallazgos generales se manifiestan en distinta medida

en cada uno de los niños afectados. De hecho, es ampliamente aceptado que existe una gran variabilidad individual en los individuos afectados por el TEL [Ullman y Pierpont, 2005]. Así, el TEL es un claro ejemplo de trastorno cognitivo caracterizado por la gran heterogeneidad y solapamiento que se han venido comentando como principales dificultades para el diagnóstico y la caracterización.

Los resultados que se acaban de apuntar se refieren al inglés, idioma en el que se han llevado a cabo la mayor parte de los estudios. Los estudios en castellano y en lenguas romances han sido escasos pero en la mayor parte los casos, los resultados observados en inglés son extensibles al castellano como se comenta a continuación.

- **Fonología:** Los niños hispanohablantes con TEL muestran problemas similares a los ingleses como por ejemplo problemas en la discriminación de fonemas vocálicos y fonemas nasales [Aguilar-Mediavilla et al., 2002]. Sin embargo, en la mayoría de los casos, estos errores se dan en menor proporción que en inglés. Este hecho se ha observado también en otras lenguas romances como el italiano [Bortoloini y Leonard, 2000] o el francés [Maillart y Parisse, 2006] y algunos autores lo relacionan con la mayor simplicidad del sistema fonético de las lenguas romances.
- **Morfología:** En este aspecto, los resultados obtenidos por los niños castellanoparlantes también son similares pero menos marcados que en el caso del inglés. Mientras que los niños ingleses muestran tasas de acierto del 50 % en la producción espontánea de verbos, los niños españoles superan el 80 % [Bedore y Leonard, 2005; Gutiérrez-Clellen et al., 2000]. Sin embargo, los problemas persisten tanto en la morfología flexiva como en la morfología derivativa, donde muestran errores de sustitución de género en los artículos y sustantivos [Bedore y Leonard, 2005].
- **Sintaxis:** Como en el caso del inglés, los errores más comunes tanto en la producción como en la comprensión del lenguaje se dan en estructuras sintácticas complejas como los pronombres clíticos [Bedore y Leonard, 2001]. Aunque también presentan errores de omisión y sustitución en estructuras más simples como el sintagma nominal [Bedore y Leonard, 2005].
- **Semántica:** Este ámbito, junto con el de la pragmática, ha sido el menos estudiado en castellano. Sin embargo algunos estudios han recogido problemas de los niños españoles en el aprendizaje de nuevo vocabulario [Restrepo, 1998]

6.1.1. Teorías existentes sobre el TEL

El TEL ha sido ampliamente estudiado desde distintas perspectivas. Sin embargo, no existe una teoría capaz de explicar por completo su particular perfil de comportamiento. Como se ha comentado en varias ocasiones, existen dos razones principales para este hecho: la heterogeneidad y el solapamiento. El TEL presenta un perfil de comportamiento altamente heterogéneo [Leonard, 1998]. Distintos individuos presentan normalmente amplias diferencias tanto en la severidad del desorden como en los factores afectados por el mismo. Este hecho ha llevado a la definición de diferentes subgrupos dentro del TEL [Bishop, 2000; Gopnik y Crago, 1991] e incluso diferentes definiciones del trastorno para cada perfil de comportamiento dentro del TEL. La otra razón principal es el alto grado de solapamiento existente entre el TEL y otros trastornos cognitivos. Como se ha visto, el TEL afecta tanto al lenguaje como a distintas funciones extralingüísticas lo cual hace que sus síntomas se solapen con los de distintos trastornos. Así, el TEL concurre con otros trastornos como el Trastorno Semántico-Pragmático y diversos trastornos del espectro autista [Bishop, 2000], el Trastorno por Déficit de Atención - Hiperactividad [Tirosh y Cohen, 1998] o algunos trastornos motores [Hill, 2001]. Estos factores hacen muy difícil distinguir el TEL de otros trastornos cognitivos así como diferenciar entre distintas categorías dentro de su perfil de comportamiento. Así pues, no existe una teoría unificada que explique el particular perfil de comportamiento presente en el TEL. Existen tres teorías principales que tratan de explicarlo: la del déficit gramatical específico (DGE), el déficit de procesamiento (DP) y la hipótesis del déficit procedural (HDP)¹

6.1.1.1. Déficit Gramatical Específico (DGE)

Las teorías del DGE consideran que el TEL se debe a un déficit en el procesamiento de la gramática. Probablemente, el ejemplo más famoso de estas teorías sea la “*Extending Optional Infinitive hypothesis (EOI)*” [Rice et al., 1995]. Los niños con un desarrollo normal atraviesan una etapa en la que omiten algunos sufijos verbales (marcadores de tiempo, número y persona) [Wexler, 1994]. Esta hipótesis sostiene que esta etapa de inmadurez gramatical se extiende en los niños con TEL. Otros autores argumentan que los problemas con la gramática se deben a la infrarrepresentación de algunas características lingüísticas y gramaticales [Van der Lely, 1994; Gopnik y Crago, 1991]. Aunque estas teorías explican bastante bien gran parte del perfil lingüístico de los niños con TEL, no son capaces de explicar por completo dicho perfil lingüístico ni en inglés ni en otros idiomas. Además, una explicación puramente gramatical no puede explicar los problemas que presentan los niños con TEL en algunas tareas no relacionadas con el lenguaje.

¹En inglés estas teorías son conocidas como “*Grammar specific deficit*”, “*Processing deficit*” y “*Procedural deficit hypothesis*”.

6.1.1.2. Déficit de procesamiento (DP)

Algunos autores atribuyen los problemas asociados al TEL a un déficit de procesamiento no relacionado con el lenguaje. Este déficit de procesamiento puede ser de carácter general o específico a algunos sistemas cognitivos concretos (véase Bishop et al. [2006] para un breve repaso). Las teorías de déficit de procesamiento general consideran que los niños con TEL tienen una capacidad de procesamiento de la información limitada [Leonard et al., 1992, 1997]. La generalidad del trastorno propuesto por estas teorías facilita la explicación de muchos de los problemas de los niños con TEL. Sin embargo, estas teorías fallan a la hora de explicar algunos problemas lingüísticos y no lingüísticos [Leonard, 1998; van der Lely y Ullman, 2001]. Existen también algunas teorías que consideran que el TEL es causado por un déficit muy localizado en el sistema fonológico que llega a afectar a la memoria de trabajo [Gathercole y Baddeley, 1990]. Del mismo modo que las anteriores, estas teorías fallan a la hora de dar una explicación a algunos de los problemas que presenta el TEL en diversas tareas lingüísticas y no lingüísticas [Leonard, 1998; van der Lely y Ullman, 2001].

6.1.1.3. Hipótesis del déficit procedural (HDP)

De acuerdo con el modelo declarativo-procedural [Ullman, 2001], existe una disociación en el sistema cognitivo entre la memoria declarativa y la memoria procedural. La memoria declarativa almacena el conocimiento semántico mientras que la memoria procedural se encarga del aprendizaje, la gramática y las tareas basadas en reglas. La hipótesis del déficit procedural [Ullman y Pierpont, 2005] es una extensión de este modelo, que propone que el TEL es básicamente un trastorno del sistema procedural. La memoria declarativa trata de compensar este déficit pero el resultado sigue siendo un perfil de comportamiento distinto del normal [van der Lely y Ullman, 2001]. De este modo, los autores explican los problemas lingüísticos relacionados con la adquisición de la sintaxis y los déficits motores presentes en el TEL argumentando que esos déficits motores tienen que ver con tareas de aprendizaje de secuencias implícitas de las que se encarga la memoria procedural. La HDP parece ser la teoría más completa hasta la fecha sobre el TEL. Sin embargo, algunos autores apuntan que algunas de sus conclusiones no tienen por qué ser necesariamente ciertas [Thomas y Karmiloff-Smith, 2005] y que un enfoque de aprendizaje estadístico basado en el modelo declarativo-procedural podría dar una mejor explicación del perfil de comportamiento del TEL [Hsu y Bishop, 2010].

6.1.2. Caracterización y diagnóstico del TEL

El diagnóstico del TEL se ha basado tradicionalmente tanto en criterios de inclusión (por ejemplo, baja puntuación en distintas medidas de lenguaje) como de exclusión (por ejemplo, ausencia de problemas auditivos o inteligencia no-verbal en los rangos normales)

a partir de test estandarizados. Los criterios ICD-10 de la Organización Mundial de la Salud para el TEL [World Health Organization, 1993] indican que el diagnóstico del TEL ha de basarse en medidas de comprensión y expresión estándar. El ICD-10 especifica que un individuo diagnosticado con TEL ha de puntuar en alguna de esas medidas más allá de 2 desviaciones estándar del valor medio. Sin embargo el umbral de 2 desviaciones estándar es arbitrario y no cuenta con ningún tipo de validación experimental. De hecho, distintas organizaciones recomiendan distintos valores para ese umbral, variando incluso entre distintos estados de los Estados Unidos [Spaulding et al., 2006]. Más aún, el ICD-10 no especifica de forma concreta los tests que deben ser usados para el diagnóstico. De este modo, el diagnóstico del TEL carece de un método estándar validado.

La importancia de un diagnóstico correcto y temprano es innegable. El trastorno del lenguaje puede provocar un retraso severo tanto en el entorno educativo como en el social. Aunque una terapia adecuada puede reducir los efectos del TEL, se ha comprobado que éstos suelen perdurar en la etapa adolescente e incluso más adelante si no son tratados en una edad temprana [Law et al., 2004]. Por otra parte, dadas las consecuencias sociales y educativas de los casos de TEL, es importante encontrar métodos capaces de diagnosticar evitando tanto los falsos positivos como los falsos negativos. Un caso de falso negativo (es decir, un niño con TEL diagnosticado como normal) tiene consecuencias dramáticas para el paciente ya que, como se ha comentado, la ausencia de intervención provoca que los problemas de lenguaje permanezcan hasta la edad adulta. Un caso de falso positivo (un niño normal diagnosticado con TEL), a pesar de no tener ningún tipo de consecuencia para el paciente, conlleva el gasto de medios en una terapia que realmente no es necesaria. Por tanto, cualquier método de diagnóstico ha de tratar de minimizar estos errores. Como se ha comentado, algunos autores consideran que para que un método de diagnóstico sea considerado aceptable, ha de mostrar unos porcentajes de sensibilidad y especificidad por encima del 80 % [Plante y Vance, 1994].

6.1.2.1. Enfoques clásicos

El enfoque general para evaluar el desarrollo del lenguaje consiste en el uso de tests de lenguaje en distintos niveles tales como tareas de inflexión o pruebas de vocabulario, entre muchos otros [Leonard, 1998]. Por lo general, los niños que muestran un comportamiento significativamente peor que el promedio en dos o más de estas medidas son diagnosticados como niños con TEL. El principal problema de estos métodos es la definición de comportamiento “significativamente peor”. Como se ha visto, la elección del umbral por debajo del cual se considera TEL es en la mayoría de los casos arbitraria y muy diferente. Además, los métodos estándar tienden a definir un mismo umbral para los distintos tests empleados

en una misma batería. Sin embargo, como se vio, las distintas áreas del lenguaje no se ven afectadas de la misma manera en los niños con TEL. De este modo, un umbral adecuado en un test de morfología verbal podría no ser adecuado para un test de vocabulario. Por tanto, la validez de los métodos de diagnóstico basados en tests normalizados ha sido ampliamente cuestionada. Por ejemplo, alguno de estos métodos llega a presentar un 71 % de falsos positivos [Tomblin et al., 1997]. De hecho, en un estudio exhaustivo sobre la fiabilidad de distintos métodos comerciales, Spaulding et al. [2006] encontraron que tan sólo 9 de los 43 métodos comprobados daban valores de sensibilidad y especificidad (el resto no aportaba ningún tipo de validación) y sólo 5 de esos 9 mostraban valores de especificidad y sensibilidad por encima del 80 %. Estos problemas a la hora de establecer el umbral de referencia han llevado a la búsqueda de umbrales específicos para cada test que maximicen la sensibilidad y especificidad del diagnóstico [Plante y Vance, 1994]. Sin embargo, estos enfoques han mostrado gran variabilidad en los porcentajes de acierto al ser aplicados a distintos grupos de sujetos. Esto se debe a que la mayoría de estos tests se basan en el vocabulario y, por tanto, los resultados dependen en gran medida del entorno lingüístico en el que se ha desarrollado cada sujeto [Campbell et al., 1997]. A pesar de que tratar de eliminar esta influencia resulta muy complicado, se han desarrollado otros tipos de tests basados en las capacidades de procesamiento [Campbell et al., 1997] o en las capacidades de aprendizaje de cada sujeto [Peña et al., 2001].

Otro de los enfoques más comúnmente utilizados consiste en el uso de muestras de habla espontánea. Algunos autores apuntan que los tests estándar pueden dejar escapar determinados aspectos de la producción y comprensión del lenguaje [Dunn et al., 1996; Conti-Ramsden y Botting, 1999]. En lugar de restringir la medida de las distintas capacidades del lenguaje a las características de cada uno de los tests, las muestras de habla infantil espontánea permiten recoger las distintas capacidades lingüísticas tal y como las usan los niños libremente. Dunn et al. [1996] estudiaron un grupo de niños en edad preescolar que obtuvieron puntuaciones normales en una serie de tests del lenguaje a pesar de que, posteriormente, fueron diagnosticados con TEL. Al analizar muestras de su habla espontánea se encontró que los niños que posteriormente fueron diagnosticados con el trastorno producían una mayor cantidad de errores morfológicos, sintácticos, semánticos y pragmáticos que los niños sin trastorno. De este modo demostraron por tanto, la incapacidad de algunos tests para recoger determinados problemas lingüísticos.

Las medidas típicamente obtenidas a partir de las muestras de habla espontánea abarcan gran cantidad de aspectos como la longitud media de la expresión (MLU), el porcentaje de errores en diferentes ámbitos o el porcentaje de uso de determinadas construcciones.

Este tipo de medidas han sido utilizadas en diferentes estudios en combinación con un análisis discriminante lineal para comprobar el poder discriminatorio de cada una de ellas y de las distintas combinaciones [Bedore y Leonard, 1997; Simon-Cereijido y Gutiérrez-Clellen, 2007], obteniendo resultados por encima del 90 % de sensibilidad y especificidad [Bedore y Leonard, 1997]. En particular, las medidas con las que mejores resultados se han obtenido son las de errores en la morfología verbal y longitud media de la expresión para el inglés [Bedore y Leonard, 1997] y una combinación de distintos errores gramaticales para el castellano [Restrepo, 1998; Simon-Cereijido y Gutiérrez-Clellen, 2007]. Simon-Cereijido y Gutiérrez-Clellen [2007] estudiaron la capacidad discriminativa de distintas medidas lingüísticas en un corpus de niños castellanoparlantes mediante el uso de un análisis discriminante lineal. La tabla 6.1 muestra un resumen de los resultados obtenidos por los autores del estudio utilizando como conjunto de test el mismo conjunto de niños con los que se obtuvo la función discriminante. Dado que ese método de evaluación no es el más apropiado, se realizó un estudio por separado usando validación cruzada (columnas de la derecha de la tabla). Dado que el análisis discriminante lineal es una de las técnicas más usadas, éste método será usado como método de referencia con el que comparar los resultados de otros métodos.

Tabla 6.1: Tabla resumen con los resultados del estudio de Simon-Cereijido y Gutiérrez-Clellen [2007].

Medida	Conjunto de entrenamiento		Validación cruzada	
	Sensibilidad	Especificidad	Sensibilidad	Especificidad
VERB	0.68	0.89	0.5	0.75
MLUW + UNGRAMM	0.79	1.00	0.54	0.75
CLIT + VERB + ART	0.79	1.00	0.58	0.81

VERB: errores en la morfología verbal; MLUW: longitud media de la oración; UNGRAMM: tasa de frases no gramaticales; CLIT errores en los clíticos; ART: errores en los artículos.

Como se ha comentado, los resultados obtenidos muestran la utilidad de los errores de morfología verbal tanto por separado como junto con otras medidas lingüísticas. Por tanto, estos resultados avalan el uso de la información morfológica en las tareas de caracterización y diagnóstico del TEL. Por último, existen algunas medidas basadas en tareas no-lingüísticas tales como la sensibilidad auditiva, la interacción social y física o el estado neurológico, que han mostrado ser de cierta utilidad en combinación con las medidas lingüísticas [Leonard, 1998].

6.1.2.2. Técnicas de Inteligencia Artificial

La introducción de métodos de análisis automáticos de las transcripciones de habla espontánea ha multiplicado el número de variables disponibles para el diagnóstico. Este

hecho ha provocado que en la última década se hayan comenzado a utilizar distintas técnicas de inteligencia artificial para el desarrollo de métodos de ayuda al diagnóstico del TEL. Georgopoulos et al. [2003] proponen el uso de mapas cognitivos borrosos para el diagnóstico diferencial del TEL frente a otros trastornos solapados como la dislexia o el autismo. Los mapas cognitivos borrosos combinan las técnicas de lógica difusa con las redes neuronales y han sido aplicados con éxito en distintos sistemas de ayuda al diagnóstico [Stylios et al., 2008]. La propuesta de Georgopoulos et al. [2003] tiene en cuenta 15 factores lingüísticos (como por ejemplo problemas sintácticos o morfológicos) y no lingüísticos (como problemas motores, sociales o de atención) como criterios de diagnóstico de los distintos trastornos. Esta técnica fue aplicada a cuatro casos existentes en la literatura (dos niños con TEL, uno con dislexia y uno con autismo). En todos los casos, el diagnóstico sugerido por el sistema fue el acertado. Sin embargo, esta evaluación basada en tan solo 4 casos no deja claro si la metodología propuesta es realmente útil para el diagnóstico diferencial.

Solorio y Liu [2008] proponen el uso de modelos del lenguaje (también usados en otros problemas de ayuda al diagnóstico de trastornos cognitivos [Roark et al., 2007]). Los modelos del lenguaje son una herramienta estadística, basada en los modelos de Markov, que permite calcular la probabilidad de una determinada secuencia de palabras o de clases de palabras. En muchos casos, los modelos de lenguaje usan las categorías gramaticales en lugar de las propias palabras cuando las muestras no son muy amplias [Roark et al., 2007; Solorio y Liu, 2008]. En particular, en el diagnóstico del TEL es particularmente interesante usar las categorías gramaticales para evitar los problemas de las pruebas basadas en el vocabulario (véase la sección anterior). Así, los modelos utilizados por Solorio y Liu [2008] son capaces de encontrar patrones gramaticales atípicos en las muestras de habla espontánea de los dos niños que utilizan en su estudio preliminar. El principal problema de estas técnicas es que necesitan gran cantidad de datos y que sólo son capaces de encontrar información en los patrones gramaticales, a pesar de que se ha visto que el TEL afecta a muchos otros aspectos lingüísticos y extralingüísticos.

Gabani et al. [2009, 2011] ahondan en el trabajo iniciado por Solorio y Liu [2008] con los modelos del lenguaje usando distintas combinaciones de n-gramas y usando además modelos basados en palabras y modelos basados en categorías gramaticales. Como era de esperar, los modelos basados en palabras obtuvieron peores resultados en la detección del trastorno en los dos grupos y tareas estudiados. Además, en su estudio, Gabani et al. [2009, 2011] proponen el uso de distintas técnicas de aprendizaje automático para la predicción del TEL. Para ello utilizaron distintas variables lingüísticas relativas a la productividad

en el lenguaje, las capacidades morfosintácticas, el conocimiento del vocabulario, la fluidez en el habla, o las propias probabilidades obtenidas a partir de los modelos del lenguaje. Estas variables fueron utilizadas en el aprendizaje de 4 modelos diferentes: Naïve Bayes, red bayesiana, máquina de vector de soporte (SVM) y logitBoost. Los resultados obtenidos en el diagnóstico de un grupo de 623 niños con desarrollo normal y 54 diagnosticados con TEL pueden verse en la tabla 6.2.

Tabla 6.2: Comparación de distintos modelos del lenguaje (LM) y técnicas de aprendizaje automático (ML) para el diagnóstico del TEL. Tabla extraída de Gabani et al. [2011]

Método		Sens. (%)	Espec. (%)	LR+	LR-
Baseline		37.04	0.92	04.44	0.69
1-gram POS-LMs		70.37	0.70	2.36	0.42
2-gram POS-LMs		33.33	0.98	13.84	0.68
3-gram POS-LMs		11.11	1.00	69.22	0.89
4-gram POS-LMs		7.41	1.00	46.15	0.93
ML	Naïve Bayes	70.37	0.80	3.51	0.37
	Red Bayesiana	66.67	0.88	5.39	0.38
	SVM	46.3	0.94	7.8	0.57
	LogitBoost	31.48	0.98	15.09	0.70

Las medidas de evaluación utilizadas son: Sensibilidad (Sens.), Especificidad (Espec.), tasa de probabilidad positiva (LR+) y tasa de probabilidad negativa (LR-)

Las técnicas de aprendizaje automático obtienen, en general, mejores resultados en términos de sensibilidad. A pesar de que los resultados están lejos del 80 % en sensibilidad y especificidad aceptado como umbral para métodos de ayuda al diagnóstico, se muestra una clara mejoría con respecto a los métodos clásicos como el análisis discriminante lineal utilizado como método de referencia. Además, como señalan los autores, el corpus utilizado tiene gran cantidad de imperfecciones que dificultan la extracción de las distintas variables. De hecho, al utilizar un corpus donde las muestras de habla son más claras, los resultados obtenidos sí superan el 80 % de sensibilidad y especificidad. Por último, los autores hacen un análisis de los grupos de variables más útiles en la tarea de diagnóstico. Los únicos grupos de variables que son importantes en todas las tareas estudiadas son las de capacidades morfosintácticas y la probabilidad de los propios modelos del lenguaje (que, como se ha visto, se basa también en aspectos sintácticos).

Por tanto, los trabajos más recientes avalan la utilización de dos de los elementos fundamentales de la metodología propuesta en este trabajo de tesis: las técnicas de aprendizaje automático superan a los enfoques clásicos y la información morfosintáctica es de

gran utilidad en el diagnóstico de niños con TEL. El problema de las propuestas previas reside en que tanto los enfoques clásicos como los que usan las técnicas de aprendizaje automático tienen en común el uso de variables conductuales. Sin embargo, como se ha comentado, los patrones de comportamiento del TEL son muy heterogéneos y coinciden con los encontrados en otros trastornos cognitivos. Dadas estas condiciones, el uso de variables conductuales parece no ser suficiente. De ahí surge la propuesta de este trabajo de tesis: el acceso, a través del modelado computacional cognitivo, a los procesos que subyacen al comportamiento deficitario y al comportamiento normal puede ayudar en el proceso de diagnóstico superando las limitaciones de los métodos actuales basados únicamente en la observación de esos comportamientos.

6.2. Aplicación de la metodología propuesta al TEL

El estudio del Trastorno Específico del Lenguaje en este trabajo de tesis viene motivado por dos factores fundamentales. Como se ha visto, el TEL es un claro ejemplo de trastorno cognitivo caracterizado por un alto grado de heterogeneidad y de solapamiento, lo cual dificulta enormemente el diagnóstico temprano y personalizado, que es de vital importancia a la hora de atenuar los efectos del trastorno. Sin embargo, a día de hoy, no existe un método estandarizado capaz de emitir un diagnóstico con la suficiente fiabilidad o de caracterizar los distintos grados de afectación de cada paciente en distintas áreas. Así, uno de los objetivos de este capítulo consiste en demostrar que la metodología propuesta en el capítulo anterior puede ser un método adecuado de ayuda a la caracterización y el diagnóstico del TEL, superando muchas de las limitaciones de los métodos existentes. Por otra parte, el estudio del TEL supone una aplicación directa del modelo de adquisición de la morfología verbal presentado en la primera parte de esta tesis. Como se ha visto, uno de los problemas fundamentales que presentan los niños afectados por TEL desde las primeras etapas del trastorno está relacionado con la adquisición y procesamiento de la morfología verbal. Por tanto, la aplicación de la metodología utilizando el modelo presentado supone una forma más de comprobar la validez del modelo. Si el modelo no fuera adecuado, difícilmente podrían obtenerse buenos resultados al tratar de diagnosticar y caracterizar cualquier trastorno cognitivo y, en particular, uno tan estrechamente relacionado con el lenguaje como el TEL.

6.3. Detección de diferencias a nivel conductual

Como se ha comentado en el capítulo 5, los niños con TEL muestran gran cantidad de problemas en casi todas las áreas del lenguaje [Leonard, 1998]. En particular, la morfología

verbal es una de las áreas en las que presentan mayores problemas [Ullman y Gopnik, 1999; van der Lely y Ullman, 2001]. En castellano los errores no son tan marcados como en inglés [Bedore y Leonard, 2005; Restrepo y Gutiérrez-Clellen, 2004; Simon-Cereijido y Gutiérrez-Clellen, 2007] pero siguen constituyendo un buen marcador del TEL [Sanz-Torrent et al., 2008]. Por tanto, se decidió utilizar como tarea de estudio una tarea de flexión verbal. En particular, se utilizó el estudio de Simon-Cereijido y Gutiérrez-Clellen [2007], cuyas características se comentan a continuación:

- *Participantes*: El estudio recoge muestras de habla de 48 niños castellanoparlantes: 24 de ellos con probable TEL y 24 con un desarrollo típico del lenguaje (DT). Los niños fueron seleccionados de modo que los dos grupos estuvieran igualados en edad (DT: 4;6, TEL: 4;5) y en nivel socio-económico. Este último indicador ha sido señalado en varios trabajos como uno de los factores de riesgo de los trastornos del lenguaje [Payne et al., 1994] y, por tanto, fue controlado en el estudio. Dado que no existe un método de diagnóstico estándar, los niños del grupo TEL se seleccionaron de acuerdo a los criterios de: opinión parental, observaciones clínicas por parte de expertos en trastornos del lenguaje y puntuaciones bajas en varios subtests lingüísticos [Simon-Cereijido y Gutiérrez-Clellen, 2007].
- *Procedimiento*: La recogida de muestras de habla se realizó a partir de dos libros ilustrados. En primer lugar, el experimentador contaba la historia al niño y luego se le pedía que volviera a contar la historia con la ayuda del libro. Las transcripciones fueron analizadas para obtener las tasas de errores (y de sus distintos tipos) en el uso de artículos, clíticos (pronombres que aparecen necesariamente ligados a una forma verbal como *cómete-la*) y formas verbales, tasas de uso de estructuras transitivas y ditransitivas (oraciones con objeto directo e indirecto), omisiones en la estructura argumental y longitud media de sus expresiones. De particular interés para el experimento planteado en este trabajo son las tasas de error en la producción de formas verbales diferenciando entre sus distintos tipos: omisiones, sustituciones de conjugación, persona, número o tiempo y sobrerregularizaciones.
- *Resultados*: Los resultados muestran diferencias significativas entre el grupo de TEL y el grupo control en varias de las variables observadas. La tabla 6.3 muestra las tasas de producción de los distintos tipos de errores en la morfología verbal. A pesar de que, como ya se ha comentado, existen diferencias significativas a nivel conductual entre los niños con TEL y los niños sin el trastorno, la utilización únicamente de esta información no permite realizar un diagnóstico correcto en muchos casos. De hecho, el estudio de Simon-Cereijido y Gutiérrez-Clellen [2007] incluye un análisis

Tabla 6.3: Tasas de errores en la morfología verbal para el grupo de niños sanos (DT) y niños con probable TEL (TEL) obtenidas en el estudio de Simon-Cereijido y Gutiérrez-Clellen [2007].

	DT	TEL
Formas correctas	97.0 %	90.0 %*
Omisiones	0.2 %	1.3 %
Sobrerregularizaciones	2.1 %	5.4 %*
Sustituciones		
Conjugación	0.4 %	1.8 %*
Número-Persona	0.2 %	0.9 %
Tiempo	0.1 %	0.5 %

* Diferencia significativa ($p < 0,01$) encontrada con un test t de dos colas.

discriminante lineal con distintas combinaciones de las variables recogidas, incluidas las tasas de error en la morfología verbal. Todas las combinaciones de variables estudiadas obtuvieron resultados por debajo del 60 % en términos de sensibilidad (véase la tabla 6.1 en el capítulo 5).

6.4. Modelado cognitivo

Esta etapa de la metodología trata de solventar una de las carencias de los métodos actuales de diagnóstico. Estos métodos usan como única fuente de información distintas variables conductuales a pesar de que, como se ha comentado, el comportamiento suele ser muy heterogéneo y suele solaparse con otros trastornos. Por ello, en este trabajo se propone utilizar información relativa a los procesos que causan ese comportamiento. Para obtener dicha información se usará el modelado computacional cognitivo, utilizando los valores de los parámetros del modelo como nuevas variables a partir de las cuales construir métodos para la ayuda al diagnóstico y la caracterización. Para ello, se utilizará el modelo presentado en el capítulo 4. Como ya se ha comentado, el modelo cumple todos los requisitos señalados en la sección 5.2.2: ajuste a los datos, flexibilidad, plausibilidad psicológica e inteligibilidad. Por lo tanto, es un modelo adecuado para conseguir los objetivos de generalidad e individualización perseguidos por nuestra metodología. El vocabulario y el procedimiento experimental utilizados también son los mismos que los ya presentados en el capítulo 4:

Vocabulario: Utilizamos las formas de presente y pasado del *Spanish Verb Inventory* (SVI) [Rivera et al., 2009], que contiene 50 de los primeros verbos adquiridos en castellano.

La entrada al modelo se obtiene a partir de la distribución de frecuencias de 220 formas de pasado y 248 formas de presente. Los detalles del vocabulario pueden consultarse en la sección 3.2.3 y la lista completa de verbos puede verse en el apéndice C.

Procedimiento: Dado el infinitivo de distintos verbos, el modelo ha de flexionarlos atendiendo a diferentes combinaciones de modo, tiempo, aspecto, número y persona y aprender dichas flexiones durante su desarrollo. Las formas verbales se le presentan al modelo siguiendo la distribución de frecuencias del SVI. Cada 2000 segundos simulados el modelo “escucha” dos formas (lo que se traduce en que dos *chunks* representando formas correctas se introducen en la memoria declarativa del modelo) y se le pide que produzca una.

El procedimiento y el vocabulario utilizado para medir la habilidad del modelo en la tarea de flexión verbal difiere del utilizado en el estudio de Simon-Cereijido y Gutiérrez-Clellen [2007]. Sin embargo, los dos métodos son comparables puesto que ambos tratan de hacer una estimación de la capacidad de flexionar verbos en la producción espontánea a partir de muestras basadas en el vocabulario habitual del niño. El vocabulario usado por el modelo está basado en estimaciones de los primeros verbos adquiridos en castellano. Por tanto, constituye una buena muestra del vocabulario estándar de cualquier niño [Rivera et al., 2009]. El procedimiento simula las tasas de producción espontánea de cada verbo dado que se le pide al modelo que produzca verbos de forma aleatoria pero atendiendo a una estimación de la distribución de frecuencias real. Así pues, tanto el método de recogida de datos empíricos como el método de simulación son dos formas distintas de medir la misma capacidad para flexionar verbos espontáneamente por parte de los niños y, por tanto, los resultados obtenidos usando ambos métodos son comparables.

6.5. Individualización de los parámetros del modelo

Esta etapa de la metodología trata de solventar la segunda de las carencias de los métodos actuales de diagnóstico que se ha podido detectar al revisar el estado del arte. Los métodos actuales se centran, fundamentalmente, en el estudio del comportamiento promedio, sin prestar demasiada atención a las diferencias individuales. Esto conlleva que su diagnóstico se da siempre en términos binarios (afectado o no afectado) sin especificar las causas del trastorno ni los grados en que afecta cada una de esas causas en cada individuo. Sin embargo, la importancia de un diagnóstico individualizado para cada paciente es innegable. Por lo tanto, la metodología propuesta no pretende centrarse en el comportamiento promedio sino en el modelado de cada individuo por separado. Como ya

se ha comentado, en esta etapa se utilizará una estrategia evolutiva [Beyer y Schwefel, 2002] para obtener las combinaciones de los valores de los parámetros que permiten que el modelo computacional cognitivo se adapte mejor a cada uno de los comportamientos observados para los 48 individuos de la base de datos usada.

6.5.1. Procedimiento

Como se ha comentado en el capítulo anterior, el uso de un algoritmo genético requiere la definición del espacio de búsqueda y la definición de los elementos y operadores del algoritmo en cuestión. En este caso se usará una estrategia evolutiva con las siguientes características.

6.5.1.1. Definición del espacio de búsqueda

La definición del espacio de búsqueda sobre el que operará el algoritmo requiere seleccionar los parámetros del modelo a optimizar y acotar los posibles valores que estos parámetros pueden tomar. Los parámetros a optimizar y sus rangos permitidos son los mostrados en la tabla 6.4. Por tanto, una solución o individuo de la estrategia evolutiva será un conjunto de valores, en su correspondiente rango, para dichos parámetros.

Como se comentó en el capítulo anterior, la selección de los parámetros relevantes depende, entre otros factores, de la tarea modelada y de las hipótesis que se quieran comprobar. En este caso, existen tres grandes teorías que tratan de explicar el TEL (véase la sección 6.1.1). Cada una de ellas propone, a grandes rasgos, déficits en el procesamiento gramatical, un déficit general de procesamiento (que en muchos casos se ha localizado en el procesamiento fonológico) o un déficit en la memoria procedural. De ahí que se hayan seleccionado como objeto de estudio los parámetros involucrados en estas tres grandes áreas. Además, se mantuvieron en el estudio los parámetros relacionados con la memoria declarativa puesto que tienen una influencia directa en el comportamiento del modelo en esta tarea en cuestión.

A la hora de acotar los valores de estos parámetros es necesario tener en cuenta rangos que, por una parte, mantengan la plausibilidad psicológica del modelo pero que, a su vez, permitan el modelado del comportamiento deficitario. Como se comentó en el capítulo anterior, se ha utilizado la base de datos propuesta por Wong et al. [2010] para obtener los valores medios de los parámetros en numerosos modelos ACT-R de tareas muy diferentes. Los valores mínimo y máximo de cada parámetro fueron fijados usando la desviación típica de cada uno de ellos multiplicada por 5. Este amplio margen permite acomodar algunas

Tabla 6.4: Definición del espacio de búsqueda en la aplicación de la metodología al TEL. Atributos utilizados y rango de valores permitido.

Tipo	Atributo	Rango
Memoria declarativa	RT	$-0,02 \pm 5 \cdot 0,62$
	ANS	$0,43 \pm 5 \cdot 0,34$
	BLL	$0,4 \pm 5 \cdot 0,31$
Memoria procedural	α	$0,01 \pm 5 \cdot 0,03$
	EGS	$0,13 \pm 5 \cdot 0,46$
Procesamiento gramatical	γ_m	$0,1 \pm 0,5$
	$\gamma_m - dec$	3 ± 5
	Conj-PM	$-2,8 \pm 5$
	NP-PM	$-3,6 \pm 5$
	MTA-PM	-3 ± 5
Procesamiento fonológico	γ_f	$0,1 \pm 0,5$
	$\gamma_f - dec$	3 ± 5
	FON-PM	4 ± 5

teorías que apuntan que el comportamiento deficitario no es más que un reflejo de la cola de la distribución normal de determinadas capacidades cognitivas [Thomas y Karmiloff-Smith, 2003]. El único de los valores de los parámetros que no se mantiene en el rango definido de esta manera es el parámetro α . El hecho de que su valor sea muy inferior al valor promedio se debe a que todos los modelos incluidos en la base de datos utilizada tratan con tareas de aprendizaje a corto plazo en las que no se pretende modelar el desarrollo cognitivo. Como se vio en el capítulo 4, los valores de los parámetros que no son específicos de ACT-R sino del modelo presentado (parámetros de procesamiento gramatical y procesamiento fonológico) fueron fijados en base a estudios previos sobre la adquisición de las características gramaticales en castellano [Gathercole et al., 1999; Montrul, 2004] y adaptados manualmente para adecuarse tanto al castellano como el inglés. En este caso, para definir el espacio de búsqueda se usó el valor promedio utilizado en los modelos del castellano y el inglés.

6.5.1.2. Definición de la Estrategia Evolutiva

El objetivo de la estrategia evolutiva es encontrar, para cada individuo, el conjunto de parámetros que hacen que el comportamiento del modelo se ajuste más al comportamiento del individuo. Por tanto, la función de ajuste utilizada será el error cuadrático medio entre el vector de porcentajes de cada tipo de error observado en los individuos y en el modelo en la misma edad simulada. Los operadores utilizados en esta estrategia evolutiva son:

Cruce: se usará, como se usa típicamente en las estrategias evolutivas [Beyer y Schwefel, 2002], una recombinación discreta para los genes y recombinación intermedia para los parámetros endógenos. Los padres son seleccionados de forma aleatoria siguiendo una distribución uniforme. Para el parámetro ρ (número de padres para generar un descendiente) se usará el valor estándar de 2.

Mutación: Se usará una mutación no correlacionada con n tamaños de paso. Para los parámetros de aprendizaje τ y τ' se utilizaron los valores recomendados [Schwefel, 1995]:

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{2n}} \quad \tau' = \frac{1}{\sqrt{\sqrt{2n}}} \quad (6.1)$$

Donde n es el número de genes. En este caso, 13. La elección de la estrategia de mutación adecuada no es fácil. A medida que la complejidad del operador de mutación aumenta, el número de parámetros que han de ser ajustados con el proceso de evolución aumenta y por lo tanto aumenta también el tiempo requerido para encontrar soluciones. De hay que sea recomendable comenzar con una mutación no correlacionada de n pasos y a partir de los resultados usar una u otra estrategia. Se deberá usar un modelo más simple (como la mutación no correlacionada de paso único) si se obtienen soluciones buenas con demasiado coste computacional (o si todos los parámetros endógenos evolucionan a un mismo valor). Se deberá usar un modelo más complejo (como la mutación no correlacionada) si no se encuentran soluciones suficientemente buenas. Por tanto, se decidió utilizar una mutación no correlacionada con n pasos. Dado que los resultados obtenidos fueron muy buenos (en todos los casos convergieron a zonas del espacio de búsqueda muy próximas) y se obtuvieron en un tiempo razonable (recuérdese que, en este tipo de aplicación, el tiempo no es un factor determinante) no se utilizó ningún otro tipo de estrategia.

Selección de individuos: Se usará un tipo de selección (μ, λ) . Existen varias razones por las que se suele usar este tipo de selección de individuos en las estrategias evolutivas [Eiben y Smith, 2002]. En este caso se ha elegido por dos razones:

- Como ya se ha señalado, es previsible que el espacio de búsqueda definido por los parámetros de ACT-R sea muy complejo, con numerosos óptimos locales. En esas condiciones es más adecuado el uso de la estrategia (μ, λ) puesto que, al descartar todos los padres, tiene más facilidad para abandonar los óptimos locales.
- La selección $(\mu + \lambda)$ puede dificultar el mecanismo de autoadaptación. Los parámetros endógenos mal adaptados podrían sobrevivir generación tras generación si los genes del individuo en cuestión tienen un buen ajuste.

En cuanto a los parámetros μ y λ , se recomienda que el valor de λ sea mucho mayor que el de μ . En concreto, se recomienda un valor aproximado de $\mu = \lambda/7$ [Eiben y Smith, 2002]. En este caso concreto, se usaron los valores de $\lambda = 100$ y $\mu = 15$, en consonancia con lo recomendado en varios trabajos [Beyer y Schwefel, 2002; Eiben y Smith, 2002]

6.5.2. Resultados

Los valores óptimos para cada parámetro se calcularon como el valor medio obtenido en 10 ejecuciones de la estrategia evolutiva, la cual convergió en todos los casos a una zona del espacio de búsqueda muy similar tras 200 generaciones (condición de parada). La correlación entre el vector de porcentajes de tipos de error de los niños y el modelo fue de 0.83, valor que muestra el elevado grado de ajuste conseguido. La eficiencia del método no ha sido analizada ni optimizada puesto que no es un punto importante en nuestra aplicación. Dado que los trastornos cognitivos son trastornos prolongados en el tiempo, el hecho de tardar un cierto tiempo en dar un diagnóstico no implica un cambio significativo en los efectos de las terapias. Por lo tanto, el tiempo no es un factor determinante en este problema salvo, por supuesto, que se alcancen tiempos de ejecución inmanejables.

6.6. Aplicación de técnicas de aprendizaje automático

Como se comentó en el capítulo anterior, el objetivo de esta etapa de la metodología es comprobar tres de las hipótesis de este trabajo de tesis:

- Las variables obtenidas a partir del modelado computacional cognitivo poseen una capacidad informativa y discriminatoria mayor que la de las variables conductuales.
- El uso de técnicas avanzadas de clasificación a partir de la información obtenida a través del modelado computacional cognitivo permite obtener mejores resultados en términos de ayuda al diagnóstico.
- El uso de técnicas de agrupamiento a partir de la información obtenida a través del modelado computacional cognitivo permite obtener mejores resultados en términos de caracterización y puede ser útil para apoyar o refutar distintas teorías sobre las causas del trastorno estudiado.

Para ello, se utilizan distintas técnicas de aprendizaje automático que usan la información obtenida a través de las variables conductuales observadas en la primera etapa de la metodología y la información obtenida a través de los parámetros internos del modelo computacional cognitivo obtenidos en las etapas 2 y 3. En concreto, los atributos utilizados por los distintos métodos aplicados en esta etapa se muestran en la tabla 6.5.

Tabla 6.5: Atributos utilizados en la aplicación de la metodología al TEL.

Subconjunto	Tipo	Atributo	Índice
Observables	Morfología verbal	% Correctos	1
		% Omisiones	2
		% Sobrerregularizaciones	3
		% Sustituciones conj.	4
		% Sustituciones NP	5
		% Sustituciones tiempo	6
	Artículos	% Correctos	7
		% Omisiones	8
		% Sustituciones	9
	Clíticos	% Correctos	10
		% Omisiones	11
		% Sustituciones	12
	Estructura argumental	% Transitivas correctas	13
		% Ditransitivas correctas	14
		% Omisiones argumentales	15
Internos	Memoria declarativa	RT	16
		ANS	17
		BLL	18
	Memoria procedural	α	19
		EGS	20
	Procesamiento gramatical	γ_m	21
		$\gamma_m - dec$	22
		Conj-PM	23
		NP-PM	24
		MTA-PM	25
	Procesamiento fonológico	γ_f	26
		$\gamma_f - dec$	27
		FON-PM	28

Siguiendo el diseño de esta etapa de la metodología, para comprobar los tres objetivos comentados, se aplicaron tres tipos de técnicas de aprendizaje automático: técnicas de ponderación de atributos, técnicas de clasificación y técnicas de agrupamiento. A continuación se muestran el procedimiento y los resultados obtenidos con cada uno de ellos. En todos los experimentos se utilizó la herramienta RapidMiner [Mierswa et al., 2006] usando la configuración de parámetros por defecto en todos los algoritmos.

6.6.1. Ponderación de atributos

Como ya se ha comentado, se consideró que una de las razones por las que los métodos actuales de diagnóstico del TEL no alcanzan la precisión suficiente para ser aceptados ampliamente como métodos de diagnóstico es que usan únicamente variables de comportamiento. Dado que el comportamiento es muy heterogéneo y se solapa con otros trastornos, es difícil hacer un diagnóstico diferencial e individualizado. Uno de los objetivos de este trabajo de tesis es demostrar que la información obtenida a partir del modelado computacional cognitivo puede tener una mayor capacidad informativa y discriminatoria que la obtenida a partir de la mera observación del comportamiento. Para demostrar esta hipótesis se utilizaron distintas técnicas de ponderación de atributos que, como se ha visto, permiten ordenar los distintos atributos según su valía atendiendo a distintos criterios.

6.6.1.1. Procedimiento

Como se explicó en el capítulo anterior, se usarán las técnicas de ponderación de atributos mostradas en la tabla 5.1. En todos los casos se utilizó la configuración de parámetros por defecto dada en la herramienta RapidMiner. Las distintas técnicas se aplicaron sobre el conjunto completo de atributos puesto que el objetivo es comparar la importancia de los dos tipos de atributos: observables e internos. Para la evaluación de los resultados se calculó el orden promedio de cada atributo usando las 5 técnicas propuestas en el capítulo anterior. A partir de ahí se obtuvo el orden promedio de los dos tipos de fuentes de información con cada una de las técnicas y el orden promedio global con el objetivo de comprobar si existen diferencias significativas.

6.6.1.2. Resultados

La tabla 6.6 muestra el orden dado para cada atributo por las distintas técnicas utilizadas y el orden promedio de cada atributo. La figura 6.1 muestra gráficamente esos órdenes promedio con sus desviaciones típicas y el orden promedio de los dos grupos de atributos.

En primer lugar se puede observar la importancia de cada atributo dentro de su grupo. En el caso de las variables internas, existe una clara distinción entre las cuatro variables de mayor importancia y el resto. Esas cuatro variables tienen un orden promedio de 3,6 mientras que el resto tienen un orden promedio de 14,02. Esas cuatro variables de gran importancia son las relacionadas con la memoria procedural (parámetros α y EGS) y dos de los parámetros relacionados con el procesamiento gramatical (parámetros γ_m y NP-PM). En cuanto a las variables observables, los atributos más importantes son el porcentaje de

Tabla 6.6: Ordenación de atributos dada por las distintas técnicas de ponderación de atributos utilizadas.

Subconjunto	Tipo	Atributo	Índice	Ganancia de información	Correlación	Estadístico Chi cuadrado	Ponderación por reglas	Ponderación por SVM	Promedio
Morfología verbal		% Correctos	1	8	4	11	11	2	7,2
		% Omisiones	2	18	19	25	18	15	19,0
		% Sobrerregularizaciones	3	12	5	12	12	6	9,4
		% Sustituciones conj.	4	10	21	17	15	19	16,4
		% Sustituciones NP	5	27	23	26	23	25	24,8
		% Sustituciones tiempo	6	28	27	18	13	26	22,4
Observables	Artículos	% Correctos	7	3	6	19	6	17	10,2
		% Omisiones	8	13	10	23	14	16	15,2
		% Sustituciones	9	23	24	27	27	27	25,6
	Clíticos	% Correctos	10	26	22	8	17	20	18,6
		% Omisiones	11	21	18	22	25	13	19,8
		% Sustituciones	12	25	28	28	26	24	26,2
Estructura argumental		% Transitivas correctas	13	18	26	20	22	11	19,4
		% Ditransitivas correctas	14	9	2	3	16	10	8,0
		% Omisiones argumentales	15	24	25	21	21	14	21,0
	Memoria declarativa	RT	16	16	12	9	1	9	9,4
		ANS	17	11	13	13	28	28	18,6
		BLI	18	17	20	10	1	23	14,2
Memoria procedural		α	19	1	1	2	7	5	3,2
		EGS	20	4	3	6	1	1	3
		γ_m	21	6	8	4	1	7	5,2
	Procesamiento gramatical	$\gamma_m - dec$	22	5	9	14	24	12	12,8
		Conj-PM	23	14	15	7	19	8	12,6
		NP-PM	24	2	7	1	1	4	3
Internos	Procesamiento fonológico	MTA-PM	25	15	11	16	8	21	14,2
		γ_f	26	20	14	15	20	22	18,2
		$\gamma_f - dec$	27	7	17	24	9	18	15,0
		FON-PM	28	22	16	5	10	3	11,2

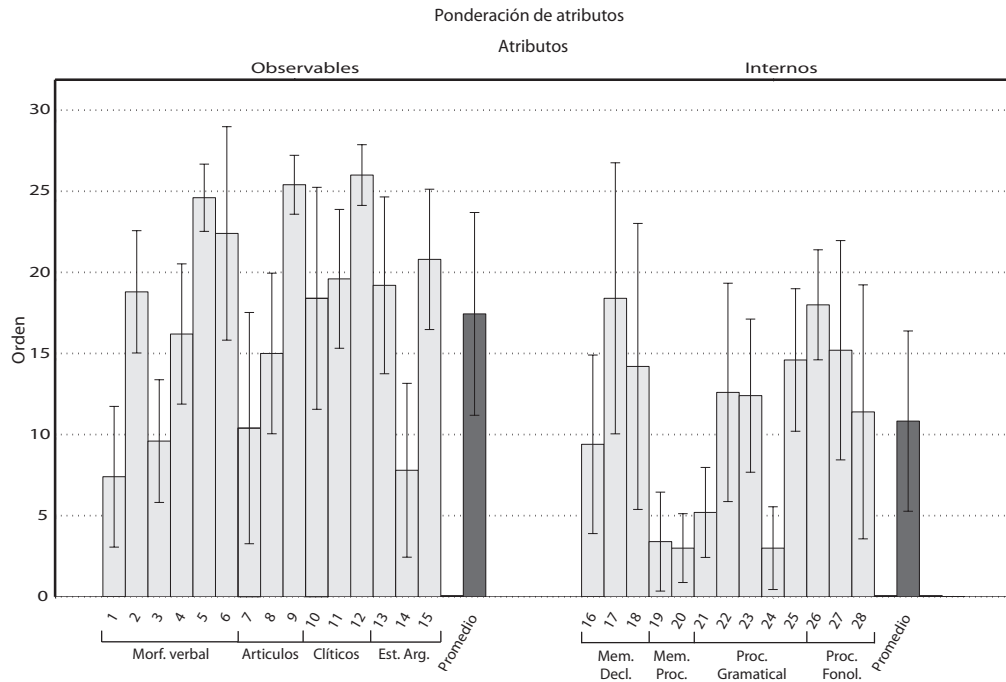


Figura 6.1: Orden promedio y desviación típica de cada uno de los atributos y de los dos grupos de atributos.

Tabla 6.7: Orden promedio de cada grupo de atributos con las distintas técnicas de ponderación de atributos utilizadas en la aplicación de la metodología al TEL.

Subconjunto	Ganancia de información	Correlación	Estadístico Chi cuadrado	Ponderación por reglas	Ponderación por SVM	Promedio
Observables	17,67	17,33	18,67	17,73	16,33	17,55
Internos	10,77*	11,23*	9,69**	10,00*	12,38	10,82**

*, ** Diferencia significativa con el valor medio obtenido con las variables observables utilizando un test t de dos colas *($p < 0,05$), **($p < 0,01$)

acierto en el uso de artículos y estructuras ditransitivas y el porcentaje de verbos correctos y de sobrerregularizaciones.

Comparando el promedio de los dos grupos de atributos se observa una diferencia significativa ($p < 0,01$) usando un test t de dos colas: las variables internas obtienen un orden menor y son, por tanto, más informativas. Para ahondar en este hecho se muestra en la tabla 6.7 el orden promedio de cada grupo con las distintas técnicas utilizadas. Como se puede comprobar, en todos los casos salvo en uno (Ponderación por SVM) el grupo de atributos internos tiene un orden promedio significativamente menor que el grupo de atributos observables.

6.6.1.3. Discusión

El objetivo de este experimento era demostrar que la información obtenida a partir del modelado computacional cognitivo puede tener una mayor capacidad informativa y discriminatoria que la obtenida a partir de la mera observación del comportamiento. Los resultados muestran claramente que esta hipótesis se cumple: los cuatro atributos más importantes pertenecen al grupo de variables internas. Y de hecho, el grupo de variables internas obtiene un orden promedio significativamente menor con todos los métodos utilizados salvo uno. Más aún, promediando los resultados de los cinco métodos, el resultado también es significativamente menor en el caso de las variables internas. Por tanto, se puede concluir que las variables internas tienen mayor valor informativo que las variables observables.

Además de la consecución del objetivo principal, se pueden extraer otras dos conclusiones importantes de este análisis:

- Las variables más relevantes del subconjunto de variables externas confirman en parte la importancia que se le ha dado tradicionalmente al estudio de la morfología verbal en el TEL. Dos de las tres variables más relevantes pertenecen a ese ámbito. Sin embargo, el resto de las variables relacionadas con la morfología verbal no aportan gran información. Este hecho sugiere la necesidad de ampliar el ámbito de análisis de los estudios conductuales más allá de la morfología verbal.
- Las variables más importantes del subconjunto de variables internas muestran la importancia de los atributos relacionados con la memoria procedural y, en menor medida, con el procesamiento gramatical. Este resultado sugiere cuáles pueden ser las áreas más afectadas en el TEL. Como se verá más adelante, este resultado es confirmado e incluso ampliado mediante el uso de las técnicas de clasificación y agrupamiento.

6.6.2. Clasificación

Como se ha visto en la revisión del estado del arte de los métodos de ayuda al diagnóstico del TEL, a día de hoy no existe un método estandarizado con una fiabilidad aceptable. Esto se puede deber, como ya se ha apuntado, a la insuficiente información aportada por las variables conductuales pero también puede deberse al escaso uso de técnicas sofisticadas para el análisis y procesamiento de esa información. La propuesta del uso de técnicas de aprendizaje automático viene motivada por los resultados prometedores obtenidos por algunos autores en problemas similares [Gabani et al., 2009, 2011]. Así pues, el experimento

planteado tiene un doble objetivo:

- Confirmar la importancia de las variables internas del modelo que se ha podido observar mediante el uso de técnicas de ponderación de atributos. Para ello se comparará la capacidad de diagnóstico de las cuatro técnicas de clasificación utilizadas usando el conjunto de variables observables, el conjunto de variables internas y el conjunto completo. Comparando los resultados obtenidos por cada clasificador con cada uno de estos conjuntos de datos se podrá comprobar si existe una mejora al usar la información interna del modelo.
- El segundo objetivo consiste en demostrar que el uso de técnicas avanzadas de clasificación permite mejorar los resultados en términos de ayuda al diagnóstico frente a los obtenidos por las técnicas de análisis clásicas. Para ello se compararán los resultados obtenidos por un clasificador clásico (LDA) y por las cuatro técnicas utilizadas usando cada uno de los conjuntos de variables.

Aunando los resultados de estos dos análisis independientes se podrá comprobar una de las hipótesis de este trabajo de tesis: *El uso de técnicas avanzadas de clasificación a partir de la información obtenida a través del modelado computacional cognitivo permite obtener mejores resultados en términos de ayuda al diagnóstico.*

6.6.2.1. Procedimiento

Como se comentó en el capítulo anterior, se usarán cuatro algoritmos distintos: una máquina de vector de soporte (SVM), un método Naïve Bayes (NB), un árbol de decisión (DT) y una red neuronal (NN). Cada uno de estos algoritmos será aplicado sobre los tres conjuntos de atributos ya que uno de los objetivos es comparar sus capacidades con cada uno de ellos. La configuración de parámetros utilizada en cada caso es la dada por defecto en la herramienta RapidMiner. Para comparar los resultados de estos cuatro clasificadores se eligió como método de referencia el método utilizado por Simon-Cereijido y Gutiérrez-Clellen [2007] en un análisis de esta misma base de datos. En ese trabajo, los autores utilizaron un análisis discriminante lineal (LDA) usando únicamente variables conductuales. El método de evaluación utilizado fue una validación cruzada *leave one out* (LOOCV). Dado que la base de datos con la que se trabaja es muy reducida, este método parece el más adecuado para obtener una medida adecuada de las capacidades de cada clasificador. A partir de esa validación cruzada se calcularon las cinco medidas de evaluación comentadas en la sección 5.1.1: sensibilidad, especificidad, tasa de probabilidad positiva, tasa de probabilidad negativa y área bajo la curva ROC (AUC). Es importante mencionar

Tabla 6.8: Sensibilidad, especificidad, tasa de probabilidad positiva, tasa de probabilidad negativa y AUC obtenidos con los 5 métodos y los 3 subconjuntos de atributos utilizados en la aplicación de la metodología al TEL.

Subconjunto	Medida	SVM	NB	DT	NN	LDA
Observables	Sensibilidad	0.67	0.73	0.69	0.67	0.58
	Especificidad	0.86	0.85	0.80	0.81	0.81
	LR+	4.79	4.87	3.45	3.53	3.05
	LR-	0.38	0.32	0.39	0.41	0.52
	AUC	0.79	0.80	0.73	0.76	0.71
Internas	Sensibilidad	0.83	0.84	0.74	0.79	0.74
	Especificidad	0.86	0.79	0.78	0.87	0.77
	LR+	5.93	4	3.36	6.08	3.21
	LR-	0.20	0.20	0.33	0.24	0.34
	AUC	0.85	0.82	0.75	0.82	0.75
Completo	Sensibilidad	0.98	1	0.90	0.96	0.87
	Especificidad	0.96	0.92	0.87	1	1
	LR+	24.5	12.5	6.92	-	-
	LR-	0.02	0	0.11	0.04	0.13
	AUC	0.96	0.95	0.89	0.97	0.90

que los resultados que se muestran para el análisis discriminante lineal no coinciden exactamente con los obtenidos por Simon-Cerejido y Gutiérrez-Clellen [2007] porque se han usado distintos métodos de evaluación. En su estudio, Simon-Cerejido y Gutiérrez-Clellen [2007] validaron en primer lugar el modelo con el mismo conjunto de entrenamiento, y, a continuación, con un reducido conjunto de test de tan sólo 5 individuos por clase. En ambos casos los resultados obtenidos son bastante cuestionables y por lo tanto, se decidió usar un método que permitiera medir esos resultados con una mayor fiabilidad como la validación cruzada. Por último, se realizó un análisis de los resultados teniendo en cuenta las dos variables involucradas en este experimento: la fuente de información (variables observables, internas o ambas) y la técnica de procesamiento de esa información (clásica o técnicas de aprendizaje automático).

6.6.2.2. Resultados

Los resultados obtenidos con los 5 clasificadores y cada uno de los conjuntos de atributos se muestran en la tabla 6.8.

Para observar más fácilmente los resultados relacionados con los dos objetivos planteados, se presentan las gráficas de la figura 6.2. En cada una de ellas se puede ver, para cada una de las 5 medidas estudiadas, los resultados obtenidos por los distintos clasificadores con cada subconjunto de atributos. De este modo es fácil confirmar la importancia de

las variables internas del modelo. Los resultados obtenidos por los distintos clasificadores mejoran en casi todos los casos al utilizar la información de los parámetros internos del modelo (bien sola o bien acompañada de la información de las variables observables).

Por su parte, las gráficas de la figura 6.3 muestran, para cada uno de los subconjuntos, los resultados obtenidos en términos de cada una de las medidas por cada una de las técnicas empleadas. De este modo es fácil confirmar que el uso de técnicas avanzadas de clasificación permite mejorar los resultados frente a los obtenidos por las técnicas de análisis clásicas. Es importante señalar que, en estas gráficas, los valores de tasa de probabilidad positiva y tasa de probabilidad negativa se muestran normalizados por motivos de escalado. En cualquier caso, la normalización no impide comprobar la relación relativa existente entre los distintos valores mostrados y, por tanto, permite su comparación.

Para comprobar la significación de los resultados que se han mostrado gráficamente se llevaron a cabo dos tests estadísticos. En primer lugar se realizó un test ANOVA de un factor para comprobar si la diferencia en los resultados de un mismo clasificador con los distintos conjuntos de atributos es estadísticamente significativa. Mediante este análisis se encontraron diferencias significativas ($p < 0,01$) entre los tres conjuntos de atributos en términos de sensibilidad en todos los clasificadores. Todos ellos (incluso el análisis discriminante lineal) mejoraron sus resultados en términos de sensibilidad usando las variables internas y mejoraron aún más al utilizar el conjunto completo de variables. De hecho, el uso de este último conjunto de atributos permitió obtener mejoras significativas con todos los clasificadores no sólo en términos de sensibilidad sino también en términos de especificidad y AUC. En segundo lugar, se realizó un test ANOVA de un factor para comprobar si las diferencias entre los distintos clasificadores y el método de referencia son significativas dentro de cada subconjunto de atributos. Todos los clasificadores salvo el árbol de decisión presentaron una mejora significativa ($p < 0,01$) sobre los resultados del método de referencia en términos de sensibilidad y AUC.

6.6.2.3. Discusión

Como se ha comentado, este experimento tenía como objetivos fundamentales:

- Confirmar la importancia de las variables internas del modelo que se ha podido observar mediante el uso de técnicas de ponderación de atributos.
- Demostrar que el uso de técnicas avanzadas de clasificación permite mejorar los resultados en términos de ayuda al diagnóstico frente a los obtenidos por las técnicas de análisis clásicas.

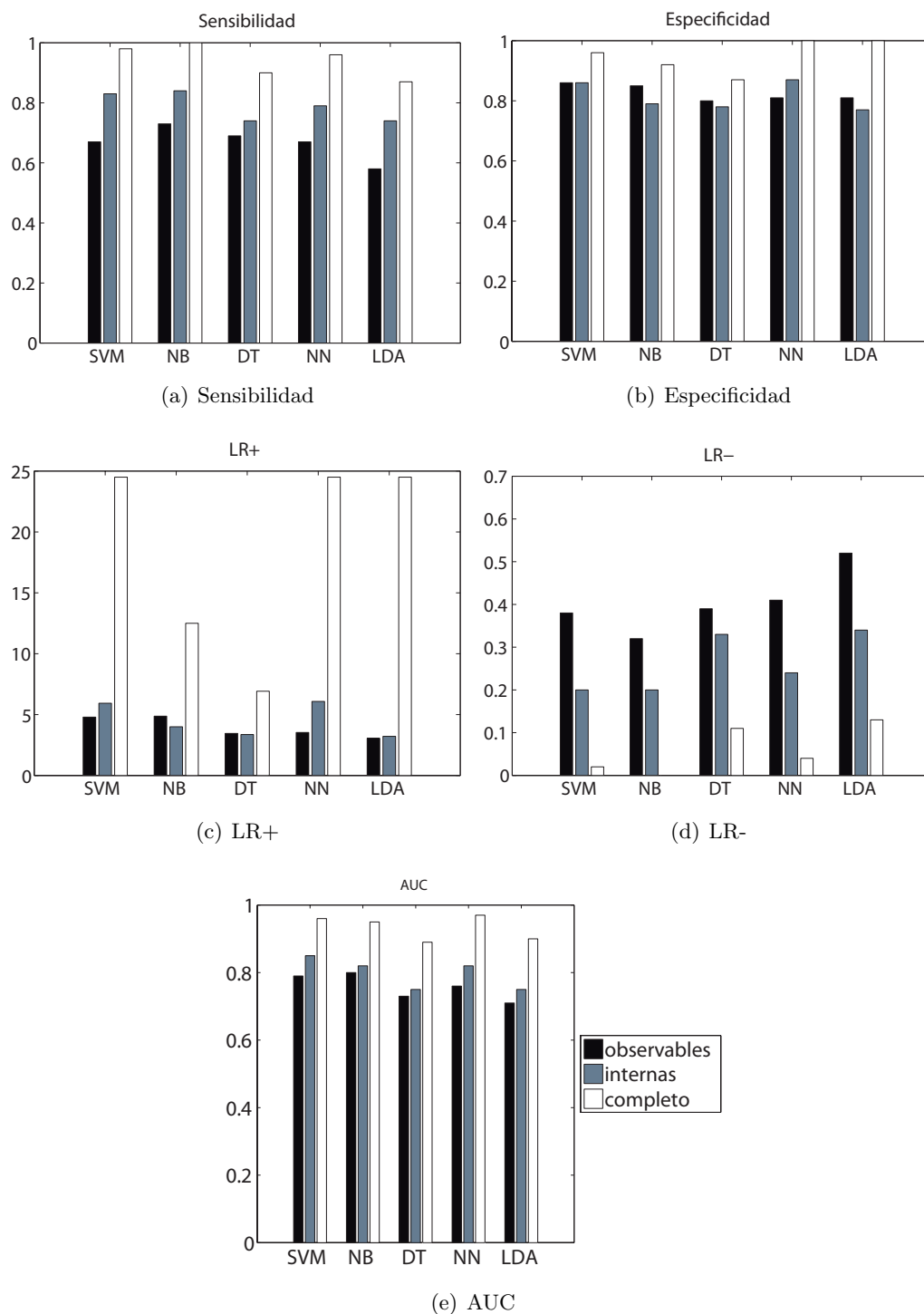


Figura 6.2: Resultados obtenidos por los distintos clasificadores con cada subconjunto de datos para cada una de las medidas de evaluación utilizadas.

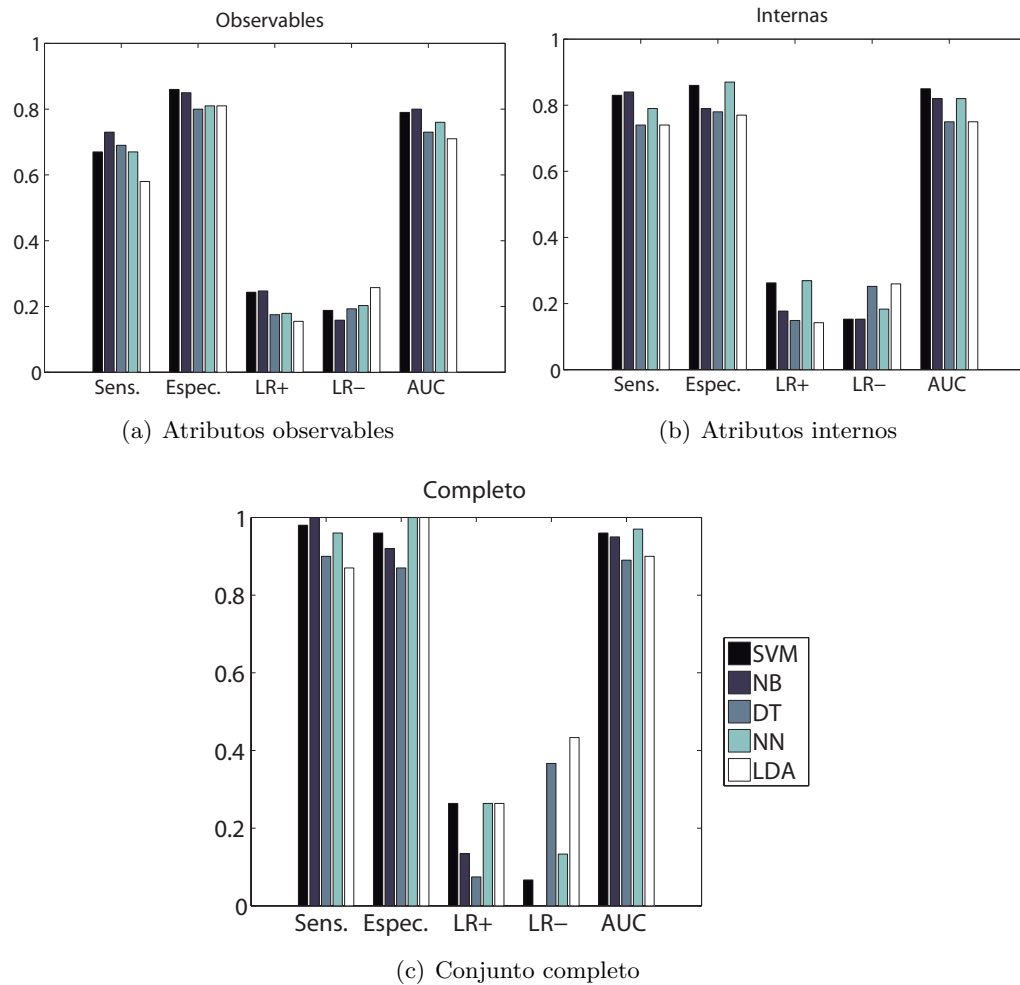


Figura 6.3: Resultados obtenidos por los distintos clasificadores en términos de cada una de las medidas de evaluación usadas con cada uno de los subconjuntos de atributos.

A la vista de los resultados, estos dos objetivos han sido alcanzados y las hipótesis que plantean, confirmadas. En primer lugar resulta fácil ver que las variables internas del modelo aportan información relevante y, por tanto, hacen que los resultados de clasificación mejoren. Al utilizar únicamente el conjunto de variables internas, todos los clasificadores mejoraron sus resultados de una forma significativa con respecto a los obtenidos al usar el conjunto de variables observables. Más aún, el uso de una combinación de las dos fuentes de información lleva a todos los clasificadores a mejorar sus resultados en términos de sensibilidad, especificidad y AUC. Este hecho confirma, como se ha venido comentando, que el uso exclusivo de variables conductuales no es el enfoque más adecuado para el diseño de técnicas de ayuda al diagnóstico de trastornos cognitivos. Sin embargo, los resultados también confirman que estas variables tienen cierta utilidad, puesto que se

obtienen mejores resultados con el conjunto completo que con el conjunto interno, y por tanto no deben ser descartadas.

La comparación de los resultados obtenidos con las cuatro técnicas de aprendizaje automático frente a los resultados del LDA permite comprobar la consecución del segundo objetivo. Todos los clasificadores salvo el árbol de decisión obtuvieron resultados significativamente mejores que el LDA en términos de sensibilidad y AUC. Es importante recordar que, en este caso, es más importante obtener buenos resultados en términos de sensibilidad porque las consecuencias de un falso negativo (diagnosticar como normal a un niño realmente afectado por el TEL) son mucho más dramáticas que las consecuencias de un falso positivo (diagnosticar como afectado por TEL a un niño que realmente no tiene el trastorno). El análisis de los resultados desde el punto de vista de los métodos de ayuda al diagnóstico es particularmente interesante. Como se vio en la sección 5.1.1, algunos autores consideran aceptables aquellos métodos de diagnóstico que presentan porcentajes de sensibilidad y especificidad por encima del 80 % [Plante y Vance, 1994] o una tasa de probabilidad positiva por encima de 10 y una tasa de probabilidad negativa por debajo de 0.1 [Gabani et al., 2011]. Como se puede comprobar, el representante de los enfoques clásicos (LDA con el conjunto de atributos observable) no supera ninguno de esos dos criterios. Sin embargo, tres de las cuatro técnicas de aprendizaje automático superan esos criterios al ser utilizadas en combinación con el conjunto de atributos completo. Por tanto, se puede concluir, como otros trabajos anteriores [Gabani et al., 2009, 2011; Oliva et al., 2013], que el uso de técnicas de aprendizaje automático puede ser de gran utilidad para la ayuda al diagnóstico de trastornos cognitivos y, en particular, para la ayuda al diagnóstico del TEL.

6.6.3. Agrupamiento

Como ya se ha mencionado, una de las características principales del TEL es su heterogeneidad. Este hecho dificulta en gran medida la búsqueda de una caracterización general del trastorno o la definición de distintos subgrupos dentro del TEL. En este experimento se plantea el uso de técnicas de agrupamiento con un triple objetivo: confirmar la importancia de las variables internas que se ha observado con las técnicas de ponderación de atributos y clasificación, localizar distintos subgrupos dentro del TEL (si es que existen, como apuntan algunos autores [Bishop, 2000; Gopnik y Crago, 1991]), mejorando así su caracterización y por último, tratar de encontrar indicios que apoyen o refuten las teorías existentes acerca del TEL (comentadas en la sección 6.1.1).

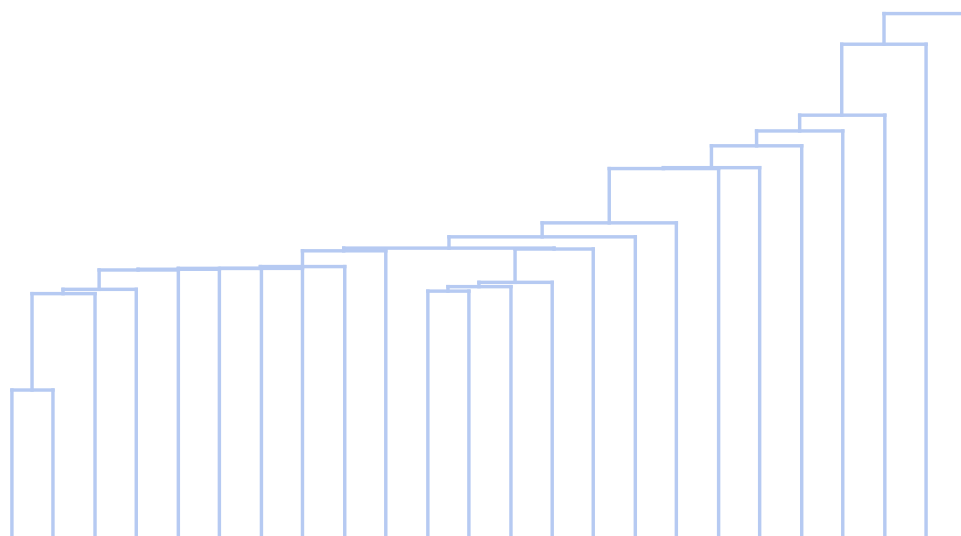
6.6.3.1. Procedimiento

Como se explicó en el capítulo anterior, se usarán dos técnicas de agrupamiento: agrupamiento jerárquico y el agrupamiento *k-medias*. En todos los casos se utilizó la configuración de parámetros por defecto dada en la herramienta RapidMiner. La técnica de agrupamiento jerárquico se aplicó sobre el conjunto de variables observables y sobre el conjunto de variables internas para comprobar la mejoría en el agrupamiento producida por el uso de las variables internas. El algoritmo *k-medias* se aplicó únicamente sobre el conjunto de atributos internos puesto que el objetivo es analizar las teorías existentes sobre el TEL y para ello es relevante únicamente la información de las variables internas. Además, se utilizaron únicamente la información de los 24 individuos afectados por el trastorno, puesto que tanto el análisis de las teorías existentes como la búsqueda de subgrupos afectan únicamente a los individuos con el trastorno. Para la evaluación se obtuvo y analizó el dendrograma resultante del agrupamiento jerárquico y, una vez conocido el número de grupos, se aplicó el agrupamiento *k-medias* para buscar diferencias significativas entre los valores de los parámetros en los distintos grupos y los valores de los parámetros en los niños sanos.

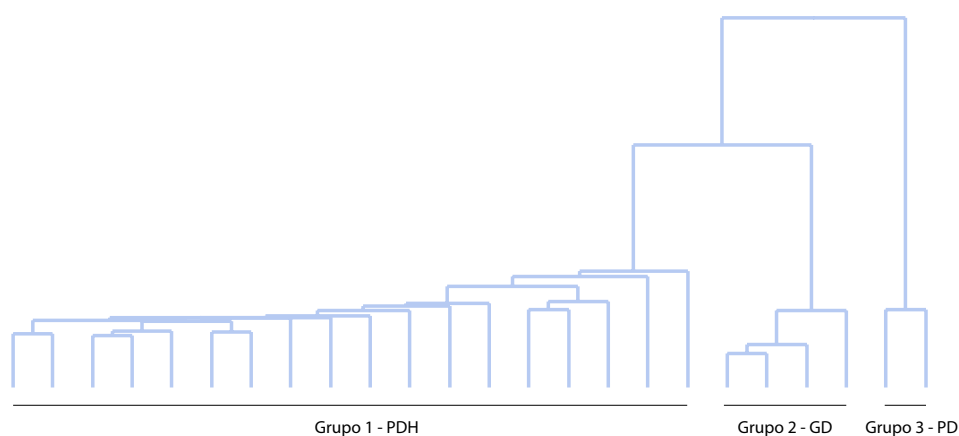
6.6.3.2. Resultados

La figura 6.4 muestra el resultado del agrupamiento jerárquico utilizando el conjunto de variables observables (figura 6.4(a)) y el conjunto de variables internas (figura 6.4(b)). La diferencia es evidente. En el dendrograma obtenido a partir de las variables observables es difícil encontrar algún tipo de agrupamiento consistente. Sin embargo, usando las variables internas se obtuvieron tres grupos muy bien diferenciados (la distancia mínima entre miembros de distintos grupos es 3.66 mientras que la distancia máxima entre miembros del mismo grupo es 1.76). Como se verá a continuación, estos tres grupos pueden ser asociados con las tres teorías que se comentaron en la sección 6.1.1. En las figuras 6.4 y 6.5 se ha incluido esa asociación para facilitar el análisis posterior.

A continuación se aplicó el algoritmo *k-medias* para buscar los centroides de esos tres grupos. Las coordenadas obtenidas para cada uno de los centroides se muestran en la tabla 6.9 señalando las diferencias significativas con respecto a los valores promedio de los niños sanos. Cada uno de los grupos muestra diferencias significativas en distintos parámetros. Estas diferencias también han sido observadas por algunos autores en el caso de las variables observables [Simon-Cerejido y Gutiérrez-Clellen, 2007]. Sin embargo, como se ha comprobado en las secciones anteriores, su poder predictivo es mucho menor que el de las variables internas. La figura 6.5 muestra los valores normalizados de las coordenadas de



(a) Agrupamiento obtenido con los atributos observables



(b) Agrupamiento obtenido con los atributos internos

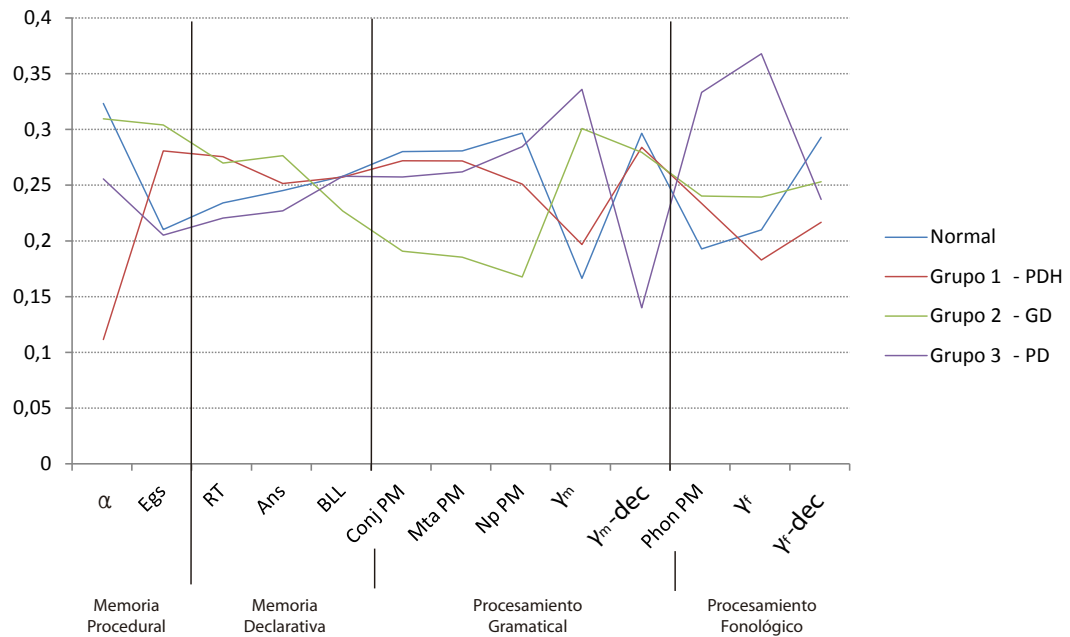
Figura 6.4: Agrupamiento jerárquico de los individuos con TEL de la base de datos de Simon-Cerejido y Gutiérrez-Clellen [2007] usando el conjunto de atributos observables (6.4(a)) y el conjunto de atributos internos (6.4(b))

cada centroide junto con el valor promedio de cada parámetro en el grupo de niños sanos. Esta representación permite ver gráficamente qué áreas difieren de los valores normales en cada uno de los grupos. Se observa fácilmente que el grupo 1 difiere principalmente en los valores de la memoria procedural, el grupo 2 en el procesamiento gramatical y el grupo 3 en el procesamiento fonológico.

Tabla 6.9: Coordenadas de los centroides obtenidos por el algoritmo k-medias: valores medios y desviaciones estándar.

		Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Control
Memoria procedural	α	3.7e-4** (1.6e-4)	1.0e-3 (2.5e-4)	8.4e-4 (1.3e-4)*	1.1e-3 (2.4e-4)
	EGS	0.23** (0.043)	0.281** (0.016)	0.190 (0.003)	0.1946 (0.016)
Memoria declarativa	RT	-0.114 (0.044)	-0.112 (0.045)	-0.092 (0.007)	-0.097 (0.022)
	ANS	0.283 (0.036)	0.311** (0.007)	0.255 (0.201)	0.276 (0.014)
	BLL	0.314 (0.014)	0.277* (0.023)	0.315 (0.014)	0.315 (0.016)
Procesamiento gramatical	γ_m	0.133 (0.082)	0.204 (0.149)	0.228** (0.005)	0.1128 (0.031)
	$\gamma_m - dec$	16.36 (1.61)	16.11 (0.85)	8.065** (0.38)	17.09 (1.42)
	Conj. PM	-6.38 (0.19)	-2.97** (0.10)	-6.17** (0.02)	-6.51 (0.39)
	MTA. PM	-2.23 (0.39)	-0.53** (0.08)	-2.16 (0.74)	-2.31 (0.39)
	NP. PM	-2.22* (0.74)	-1.08** (0.10)	-2.52 (0.12)	-2.63 (0.12)
Procesamiento fonológico	Phon. PM	-3.25* (0.62)	-3.94* (0.51)	-4.05 (0.48)	-5.62 (0.34)
	γ_f	0.081 (0.064)	0.106 (0.012)	0.163** (0.037)	0.093 (0.05)
	$\gamma_f - dec$	12.463* (1.22)	14.563 (0.93)	13.654** (0.67)	16.854 (0.32)

*,** Diferencia significativa con el valor correspondiente en el grupo de niños sanos usando un test t de dos colas *($p < 0,05$), **($p < 0,01$)

**Figura 6.5:** Valores normalizados de las coordenadas de los centroides de los tres grupos obtenidos en el agrupamiento.

6.6.3.3. Discusión

Los dos primeros objetivos de este experimento consistían en confirmar la importancia de las variables internas y localizar, en la medida de lo posible, distintos subgrupos dentro del TEL. Los resultados confirman la consecución de esos dos objetivos. En primer lugar, mientras que el agrupamiento obtenido con las variables observables no aporta ninguna información, el agrupamiento obtenido con las variables internas muestra tres grupos bien diferenciados. Por tanto, se puede concluir que las variables internas son de gran utilidad también para los algoritmos de agrupamiento. La obtención de estos tres grupos sugiere que es difícil encontrar un perfil general de comportamiento y por tanto una única caracterización del TEL. Sin embargo, la alta cohesión de esos grupos muestra que, a pesar de la heterogeneidad existente tanto a nivel conductual como en este nivel interno, es posible encontrar subgrupos dentro de los afectados por el TEL. Por tanto, a pesar de que la heterogeneidad existente al nivel conductual se mantiene, en cierta medida, en los mecanismos subyacentes, en ese nivel cognitivo se pueden encontrar patrones que pueden ser muy útiles para la caracterización del trastorno. Este hecho muestra, una vez más, la utilidad de la información obtenida a través del modelado computacional cognitivo.

El tercer objetivo de este experimento consistía en tratar de encontrar indicios que apoyen o refuten las teorías existentes acerca del TEL. Como ya se ha comentado, los tres grupos obtenidos pueden asociarse a grandes rasgos con las tres teorías explicadas en la sección 6.1.1:

Grupo 1 - PDH Este grupo muestra diferencias significativas con el grupo de control fundamentalmente en los parámetros de la memoria procedural. Tanto el parámetro α como el parámetro EGS tienen valores deficitarios. Como se ha comentado, el parámetro α controla el aprendizaje de nuevas reglas mientras que el parámetro EGS controla los niveles de ruido en la memoria procedural. Un trastorno en estos dos parámetros sugiere, en consonancia con la teoría PDH, un déficit general en la memoria procedural que no está restringido únicamente al ámbito del lenguaje.

Grupo 2 - GD Este grupo muestra diferencias significativas con el grupo de control en los parámetros relacionados con el procesamiento de las características gramaticales como modo, tiempo, aspecto, número, persona o conjugación. Los parámetros que controlan el mecanismo de *Partial matching* para estas características tienen valores muy por debajo de lo normal. Este hecho sugiere problemas en la diferenciación y procesamiento de estas características. Sin embargo, la percepción de esas características no se ve afectada. Tanto el ruido en la percepción de las características morfológicas como su decaimiento

no presentan diferencias significativas con el grupo de control. Las características de este grupo se asemejan por tanto a las características propuestas por las teorías del Déficit Gramatical (GD), que proponen que el TEL es producido por problemas específicos en el procesamiento de la gramática.

Grupo 3 - PD Las principales diferencias de este grupo con el grupo de control se encuentran en los parámetros que controlan el ruido en la percepción de las características morfológicas y fonológicas. Este hecho sugiere un déficit general en términos de procesamiento de la información. Por lo tanto, este grupo coincide aproximadamente con las teorías del Déficit de Procesamiento (PD). Sin embargo, estas teorías agrupan distintas hipótesis acerca de las áreas y procesos dañados (como por ejemplo un déficit específico en el procesamiento fonológico o un trastorno de la memoria de trabajo), de modo que sería conveniente realizar un análisis en profundidad para comprobar cuáles de esas teorías son apoyadas por la metodología propuesta.

El grupo más numeroso con mucha diferencia es el primero: 18 de los 24 individuos afectados por el TEL muestran un claro déficit en la memoria procedural. Incluso en los otros dos grupos se encuentran diferencias significativas en alguno de los parámetros relacionados con este tipo de memoria. El grupo GD (grupo 2) presenta un ruido en la memoria procedural (EGS) significativamente más alto que el grupo de control mientras que el grupo PD (grupo 3) muestra un valor reducido del parámetro α . Estos resultados muestran que las tres teorías pueden explicar algunos de los casos individuales pero también sugieren que todos los casos comparten un cierto déficit en la memoria procedural más o menos profundo dependiendo del caso. Por lo tanto, la teoría PDH parece ser la explicación más plausible del TEL. Sin embargo, se siguen observando distintos subgrupos afectados de distinta manera por el TEL. Así pues, parece importante no centrarse en buscar una explicación general para todos los pacientes del TEL sino en el estudio de las diferencias individuales y las particularidades con las que el trastorno afecta a cada individuo. En otras palabras, el hecho de que la heterogeneidad observada en el nivel conductual parece mantenerse, hasta cierto punto en el nivel cognitivo, apoya aún más la necesidad de metodologías de caracterización y diagnóstico individualizado como la presentada en este trabajo de tesis.

6.7. Discusión general

En este capítulo se ha presentado la aplicación de la metodología propuesta en este trabajo de tesis al caso del TEL. En el repaso al estado del arte en técnicas de diagnóstico

del TEL se localizaron tres limitaciones fundamentales de los métodos planteados hasta el momento. A raíz de esas limitaciones se planteó una metodología de cuatro etapas. La primera de ellas es compartida con los métodos actuales de diagnóstico y consiste en encontrar diferencias significativas a nivel conductual. Las tres etapas siguientes tratan de solventar cada una de las limitaciones detectadas:

- *Los métodos actuales usan únicamente variables conductuales para emitir un diagnóstico. Dadas las condiciones de heterogeneidad y solapamiento comentadas, esto parece ser insuficiente:* La metodología propuesta incluye una etapa de modelado computacional cognitivo que permite acceder, en cierto modo, a los mecanismos que subyacen a cada perfil de comportamiento. Se propone utilizar la información obtenida a partir de los parámetros del modelo para complementar la información de las variables conductuales.
- *Los métodos actuales se centran en el estudio de un perfil de comportamiento general. De nuevo, dada la alta heterogeneidad presente en los trastornos cognitivos, es importante tener en cuenta las diferencias individuales y el grado de afectación en cada paciente:* La tercera etapa de la metodología se centra en el modelado del individuo. Se propone encontrar, para cada individuo, la combinación de parámetros del modelo que hace que el modelo produzca un comportamiento más ajustado al comportamiento observado en ese individuo.
- *Los métodos actuales usan técnicas de análisis y procesado de la información que no son adecuadas. Por ejemplo, en muchos trabajos se usan técnicas estadísticas de separación lineal (como el análisis discriminante lineal, LDA). Pero dada la complejidad del problema, resulta difícil pensar que se esté ante un problema separable linealmente. Por tanto, los resultados pueden ser mejorados mediante el uso de técnicas más sofisticadas:* La última etapa de la metodología propone el uso de técnicas de aprendizaje automático para mejorar los resultados en términos de ayuda a la caracterización y el diagnóstico.

La superación de estas limitaciones ha conducido a la demostración de las tres hipótesis planteadas que demuestran, a su vez, la validez de la metodología propuesta:

- *Las variables obtenidas a partir del modelado computacional cognitivo poseen una capacidad informativa y discriminatoria mayor que la de las variables conductuales:* Esta hipótesis ha quedado demostrada mediante el uso de los tres grandes tipos de técnicas utilizados:

- Técnicas de ponderación de atributos: Todas las técnicas de ordenación de atributos utilizadas salvo una otorgan un orden promedio significativamente menor al grupo de variables internas. Más aún, promediando los resultados de los cinco métodos, el resultado también es significativamente menor en el caso de las variables internas. Por tanto, se puede concluir que las variables internas tienen mayor valor informativo que las variables observables.
 - Técnicas de clasificación: Todos los clasificadores utilizados mejoraron significativamente sus resultados de sensibilidad al usar el conjunto de variables internas frente a los resultados obtenidos con el conjunto de variables observables. Más aún, el uso de una combinación de las dos fuentes de información lleva a todos los clasificadores a mejorar sus resultados en términos de sensibilidad, especificidad y AUC. Este hecho demuestra la capacidad informativa y discriminatoria de las variables internas.
 - Técnicas de agrupamiento: El dendrograma obtenido con las variables observables no aporta ninguna información relevante. Sin embargo, el dendrograma obtenido con las variables internas muestra tres grupos bien diferenciados, demostrando la utilidad de estas variables también en el caso del agrupamiento.
- *El uso de técnicas avanzadas de clasificación a partir de la información obtenida a través del modelado computacional cognitivo permite obtener mejores resultados en términos de ayuda al diagnóstico:* Todos los clasificadores salvo el árbol de decisión obtuvieron resultados significativamente mejores que el LDA (método tomado como referencia de los enfoques clásicos) en términos de sensibilidad y AUC. Además, esas técnicas superan, a diferencia del LDA, los criterios comúnmente aceptados para considerar como aceptable un método de ayuda al diagnóstico.
 - *El uso de técnicas de agrupamiento a partir de la información obtenida a través del modelado computacional cognitivo permite obtener mejores resultados en términos de caracterización y puede ser útil para apoyar o refutar distintas teorías sobre las causas del trastorno estudiado:* El uso del agrupamiento jerárquico sobre el conjunto de variables internas permite encontrar subgrupos que no se pueden observar a partir de las variables de comportamiento. Por tanto, el agrupamiento jerárquico permite encontrar subgrupos dentro del TEL que antes podían pasar inadvertidos, mejorando así la caracterización del trastorno. Además, se ha podido comprobar que el estudio de las características de esos subgrupos permite apoyar, refutar o refinar las teorías existentes sobre el TEL. En particular, se ha podido observar que el grupo más numeroso presenta características que coinciden con las apuntadas por la teoría PDH. Además, los tres grupos presentaron diferencias significativas con respecto a los niños

sanos en alguno de los parámetros de la memoria procedural. Hecho que apoya nuevamente, la PDH.

Por último, los experimentos realizados en este capítulo demuestran parcialmente la consecución de los dos objetivos generales que se planteaba la metodología:

- *Personalización*: La metodología ha de caracterizar y diagnosticar cada uno de los trastornos particularizando en las peculiaridades de cada individuo. Como se ha visto, nuestra metodología tiene en cuenta las diferencias individuales a través del modelado del individuo en lugar del modelado de un comportamiento promedio. Una de las características más importantes de la metodología propuesta, derivada de este aspecto, es que no ofrece simplemente un diagnóstico binario en términos de *afectado* o *no afectado*. La metodología da indicios (los valores de los parámetros) sobre qué áreas y mecanismos subyacentes están afectados por el trastorno y sobre el grado de afectación de cada uno de ellos. Este hecho puede ser de gran importancia para el diseño de terapias individualizadas que, presumiblemente, tendrían más eficacias para mitigar los efectos del trastorno.
- *Generalidad*: La metodología de caracterización y ayuda al diagnóstico ha de poder ser aplicada con éxito a distintos trastornos cognitivos. En este capítulo se ha demostrado la utilidad de la metodología propuesta con un trastorno del lenguaje. La consecución de este objetivo se completará en el próximo capítulo donde se demuestra la validez de la metodología con un trastorno no relacionado directamente con el lenguaje.

Caracterización del Alzheimer

Actualmente los laboratorios invierten más en mejorar y producir viagra y en desarrollar mejores prótesis mamarias que en medicamentos para el Alzheimer. Esto provocará -en el curso de unos años- que más gente de la tercera edad tendrá mejores erecciones y senos más prominentes, pero no recordarán para qué los tienen.

José Saramago.

En este capítulo se muestra la aplicación de la metodología presentada en el capítulo 5 a la Enfermedad de Alzheimer (EA). El objetivo es doble: por una parte, se pretende demostrar la generalidad del modelo y por otra la generalidad de la metodología propuesta. Como se comentó en la introducción, el estudio del lenguaje puede utilizarse como una ventana hacia el estudio del funcionamiento general del cerebro. Partiendo de la idea de que muchas de las estructuras y procesos involucrados en el procesamiento del lenguaje son compartidos por varias capacidades cognitivas, se puede esperar que algunos trastornos cognitivos no directamente relacionados con el lenguaje podrían ser detectados de manera temprana estudiando el procesamiento del lenguaje. En primer lugar, la sección 7.1 aborda la problemática de diagnóstico de la EA siempre desde el punto de vista del lenguaje. Se comenta la relación existente entre la enfermedad y las distintas capacidades lingüísticas de los pacientes y, a continuación, se hace un repaso de los métodos de diagnóstico del Alzheimer haciendo hincapié en aquellos que usan información lingüística en sus distintas formas. En la sección 7.2 se resumen las motivaciones, ya comentadas, que han llevado a estudiar la EA en este trabajo de tesis. En primer lugar, en la sección 7.3 se explica el experimento llevado a cabo para recoger datos sobre las diferencias en la producción de formas verbales regulares e irregulares en pacientes con posible Alzheimer. A continuación, las secciones 7.4, 7.5 y 7.6 explican, respectivamente, la tarea de modelado de esos resultados, la individualización de los parámetros del modelo y los resultados en términos de caracterización y capacidad de diagnóstico. Por último, la sección 7.7, discute los resultados obtenidos.

7.1. La Enfermedad de Alzheimer

En su informe “*Dementia. A public health priority*” [World Health Organization, 2012] la Organización Mundial de la Salud define la Enfermedad de Alzheimer (EA) como la forma más común de demencia:

Síndrome debido a enfermedad cerebral -normalmente de naturaleza crónica o progresiva- en el que existe un trastorno de múltiples funciones corticales superiores incluyendo la memoria, el pensamiento, la orientación, la comprensión, el cálculo, la capacidad de aprendizaje o el lenguaje entre otros. Estos trastornos suelen ir acompañados , y en ocasiones precedidos, por el deterioro en el control emocional, el comportamiento social o la motivación.

Su prevalencia es muy alta y va en continuo aumento. A pesar de la falta de estudios en países subdesarrollados, se estima que en 2010 había 35.6 millones de afectados en todo el mundo y esa cifra se espera que se doble en menos de 20 años. Su incidencia es ligeramente mayor en mujeres (13.7 afectados por cada 1000 personas) que en hombres (10.6 afectados por cada 1000 personas) y se da en la mayoría de los casos a partir de los 65 años de edad. El coste económico global asociado a la prevención, diagnóstico y tratamiento de la EA supera los 600.000 millones de dólares [World Health Organization, 2012].

La EA es un caso claro, al igual que el TEL, de trastorno cognitivo con una alta heterogeneidad y solapamiento. Los individuos afectados desarrollan la EA de formas muy distintas dependiendo de las áreas del cerebro afectadas y del grado de afectación de cada una de ellas [World Health Organization, 2012]. Por otra parte, el Alzheimer concurre con otros subtipos de demencia. Sólo un 46 % de los casos diagnosticados como Alzheimer son confirmados a posteriori como Alzheimer puro. En el resto de los casos, la EA concurre con la demencia de tipo vascular, la demencia con cuerpos de Lewy y distintas enfermedades cerebro-vasculares [World Health Organization, 2012]. Más aún, el solapamiento no se reduce a trastornos derivados de la demencia. El amplio abanico de funciones cognitivas que se ven afectadas por la EA, hace que sus síntomas se den también en gran cantidad de trastornos cognitivos dificultando el diagnóstico diferencial de la EA.

Como en el caso del TEL, un diagnóstico temprano y personalizado es fundamental para atenuar los efectos del Alzheimer. De hecho, la Organización Mundial de la Salud señala el desarrollo de técnicas de diagnóstico temprano entre los cuatro objetivos fundamentales para el problema de la demencia y, en particular, de la Enfermedad de Alzheimer [World Health Organization, 2012].

7.1.1. La Enfermedad de Alzheimer y el lenguaje

La enfermedad de Alzheimer es un trastorno cognitivo caracterizado por el deterioro progresivo de distintas funciones cognitivas. Entre las funciones más afectadas en las etapas tempranas se encuentra el lenguaje. De hecho, la pérdida de capacidades comunicativas es un síntoma de la EA detectado en aproximadamente el 80 % de los pacientes en la primera etapa del desarrollo de la enfermedad [World Health Organization, 2012]. En particular, el área más afectada es la léxico-semántica y es en ella en la que se han centrado la mayoría de trabajos que relacionan la enfermedad de Alzheimer y el lenguaje. Sin embargo, existen algunos trabajos que muestran que la función del lenguaje se ve afectada casi en su totalidad. A continuación se presenta un breve resumen de algunos de estos trabajos (resúmenes más elaborados de los distintos problemas lingüísticos y su evolución en las distintas etapas de la enfermedad pueden encontrarse en Appell et al. [1982], Caramelli et al. [1998] o Taler y Phillips [2008]).

- Fonología: A pesar de que tradicionalmente se consideró que la fonología era una de las áreas preservadas en la EA, estudios más recientes muestran que algunas capacidades como el reconocimiento de fonemas o la repetición de pseudopalabras están afectadas [Croot et al., 2000]. Sin embargo, estas afecciones se han encontrado siempre en pacientes con un grado de afectación moderado. Ninguno de estos déficits ha sido encontrado hasta la fecha en etapas tempranas del desarrollo de la enfermedad. De ahí que los factores fonológicos apenas hayan sido tenidos en cuenta para el diagnóstico [Taler y Phillips, 2008].
- Morfología: En el ámbito de la morfología se ha investigado principalmente la capacidad de producción de formas de pasado de verbos regulares e irregulares así como la producción de formas de verbos no existentes. En la mayoría de estudios se han observado grandes dificultades para la producción correcta de los verbos irregulares frente a la ausencia de problemas con verbos regulares y formas no existentes (que son, en la mayoría de los casos, regularizadas) [Ullman et al., 1997; Ullman, 2004; Cortese et al., 2006]. Además de los efectos de la regularidad, también se han observado los efectos de la similitud fonológica. Los pacientes estudiados por Cortese et al. [2006] presentaron mayores problemas para conjugar aquellas formas que tenían un mayor número de *enemigos*¹ que aquellas que tienen un mayor número de *amigos*².

¹Formas cuyo infinitivo es similar fonológicamente al de la forma que se quiere conjugar pero cuyo pasado es muy distinto. Por ejemplo: *ding* - *dinged* tiene varios *enemigos* como *sing* - *sang*, *ring* - *rang* o *sting* - *stung*

²Formas cuyo infinitivo es similar fonológicamente al de la forma que se quiere conjugar y cuyo pasado es también similar. Por ejemplo: *match* - *matched* tiene varios *amigos* como *hatch* - *hatched*, *patch* - *patched* o *snatch* - *snatched*

Por tanto, se han encontrado efectos marcados tanto de la regularidad como de la similitud fonológica en los procesos de conjugación de los pacientes de EA. Este patrón de comportamiento es el predicho por el modelo declarativo/procedural. Dado que el Alzheimer se caracteriza por un déficit en la memoria declarativa, el modelo DP predice que las formas almacenadas en ella (es decir, las formas irregulares) tengan más dificultades para ser producidas correctamente. Por otra parte, como se ha visto, los procesos de recuerdo están influidos por la similitud fonológica. Este hecho provoca (como se ha visto al explicar el funcionamiento del modelo) que el recuerdo de formas verbales con gran cantidad de *enemigos* sea mucho más complicado.

- **Sintaxis:** Algunos trabajos muestran ciertos problemas de procesamiento de estructuras sintácticas complejas [Taler y Phillips, 2008]. Sin embargo, es ampliamente aceptado que el ámbito de la sintaxis es, junto con el de la fonología, el menos afectado por la enfermedad [Ullman et al., 1997; Taler y Phillips, 2008].
- **Semántica:** Los trastornos léxico-semánticos en la EA han sido los más estudiados quizás por ser los más frecuentes y los que se dan en una etapa más temprana del desarrollo de la enfermedad. Estos trastornos abarcan todo tipo de problemas relacionados con la memoria declarativa/semántica: desde problemas para nombrar objetos o recordar palabras hasta problemas en la comprensión de nombres de objetos comunes [Cherktow y Bub, 1990]. A medida que la enfermedad avanza, el vocabulario se hace más limitado hasta reducirse a unas pocas palabras [Appell et al., 1982].
- **Pragmática:** La calidad del discurso de los pacientes de EA ha sido también estudiada en cierta profundidad. El discurso de los pacientes de EA va perdiendo coherencia progresivamente, convirtiéndose en un discurso desorganizado que ha venido a llamarse “*discurso vacío*”. Numerosos estudios muestran la falta de organización de la información en los pacientes de EA desde las primeras etapas de su desarrollo [Appell et al., 1982; Taler y Phillips, 2008], la carencia de contenido informativo o la incapacidad de establecer referencias lingüísticas [Feyereisen et al., 2007].

La mayoría de los estudios citados se han realizado en inglés. El estudio de los efectos del Alzheimer en lengua castellana ha sido menos exhaustivo. Sin embargo, la mayoría de los resultados presentados en inglés son extensibles al castellano. El estudio más amplio del procesamiento lingüístico en pacientes con probable EA es el llevado a cabo por Cueto et al. [2003]. En él se analiza el comportamiento de 20 pacientes diagnosticados con posible Alzheimer en 17 tareas de las áreas fonológica, sintáctica y semántica. Los resultados mostraron diferencias significativas en las 9 tareas que requerían una mayor intervención de la memoria semántica mientras que en las tareas puramente fonológicas o sintácticas

no se encontraron diferencias significativas (replicando los resultados del inglés). En el ámbito de la morfología verbal no se ha realizado ningún estudio en castellano. Por tanto, se tomará como referencia el estudio de Walenski et al. [2009] en italiano. En él se estudió la producción de formas de presente y pasado de verbos regulares, irregulares y nuevos en 12 pacientes con probable EA. Los resultados muestran el mismo patrón observado para el inglés: los pacientes con probable EA mostraron dificultades para producir las formas irregulares y las formas de verbos nuevos similares fonológicamente a verbos irregulares. A su vez, no se observaron diferencias significativas en la producción de formas regulares y de verbos nuevos con similitud con verbos regulares. Dadas las similitudes lingüísticas, y en particular, en el ámbito de la morfología verbal entre el italiano y el castellano, es de esperar que estos resultados sean extensibles al castellano. Este hecho unido a la ausencia de trabajos que estudien la morfología verbal en pacientes castellanoparlantes con probable EA, ha llevado a incluir ese estudio como parte de este trabajo de tesis.

7.1.2. Caracterización y diagnóstico de la EA

El diagnóstico del alzheimer se basa en criterios de inclusión y de exclusión. Los criterios de inclusión comúnmente utilizados son los llamados criterios NINCDS-ADRDA [Dubois, 2007] que evalúan el comportamiento en ocho áreas cognitivas: memoria, lenguaje, atención, percepción, habilidad creativa, orientación, resolución de problemas y habilidad funcional. Estos criterios se evalúan a través de distintos tests neuropsicológicos. Estos criterios de inclusión básicos han sido complementados en la última década por el uso de distintas técnicas de neuroimagen (MRI, PET, etc.) y distintos biomarcadores (sangre o líquido cerebro-espinal, entre otros) como criterios complementarios de inclusión (considerando ciertas anormalidades como marcadores de la enfermedad [Dubois, 2007]) y como criterios de exclusión (utilizados para distinguir la EA de otros tipos de patologías cerebrales). Con la combinación de distintas técnicas, se han alcanzado valores de sensibilidad y especificidad en torno al 90 %. La principal desventaja de algunas de estas técnicas es su elevado coste. De ahí que, a día de hoy, se mantenga la necesidad de encontrar técnicas de diagnóstico no invasivas y de bajo coste [Jarrold et al., 2010]. En cualquier caso, el diagnóstico sólo puede ser confirmado con total fiabilidad a partir de un examen del tejido cerebral (es decir, un examen *post-mortem* [Dubois, 2007]).

7.1.2.1. Tests neuropsicológicos

Los tests neuropsicológicos han sido la herramienta utilizada tradicionalmente para el diagnóstico de la EA. En particular, el test más extendido es el MMSE (*mini-mental state examination*) [Folstein et al., 1975]. El test consiste en un breve cuestionario que evalúa

8 funciones cognitivas similares a las comentadas anteriormente. Una baja puntuación en el test se usa como indicador de un trastorno cognitivo. El MMSE ha sido y es utilizado ampliamente como primer indicador de demencia. Sin embargo, desde su creación ha recibido diversas críticas que se basan fundamentalmente en su incapacidad para dar un diagnóstico diferencial e individual (sin datos complementarios puede indicar simplemente la presencia de un trastorno cognitivo sin concretar el tipo de trastorno) y su baja sensibilidad en etapas tempranas [Tombaugh y McIntyre, 1992]. A partir del MMSE han surgido numerosos tests neuropsicológicos (un buen resumen puede verse en Pasquier [1999]). Sin embargo todos ellos adolecen, en mayor o menor medida, de los mismos problemas que el MMSE. Por tanto, algunos autores proponen el uso y análisis detallado de tests especializados en cada una de las distintas áreas cognitivas para poder dar un diagnóstico diferencial y temprano [Pasquier, 1999].

Los tests del lenguaje se han mostrado como una herramienta útil para el diagnóstico diferencial de los distintos tipos de demencia. Por ejemplo, Stevens et al. [1996] realizaron un test exhaustivo del lenguaje a 19 pacientes de EA, 19 pacientes de demencia de tipo vascular, 14 pacientes con depresión (trastorno, solapado en muchos casos con la EA) y 19 individuos de control. Los resultados indican que el test del lenguaje es capaz de distinguir algunos casos de demencia mejor que los tests neuropsicológicos clásicos. En castellano, Cuetos et al. [2003] realizaron un estudio similar. Como se ha comentado antes, en ese estudio se analiza el comportamiento de 20 pacientes diagnosticados con posible Alzheimer en 17 tareas de las áreas fonológica, sintáctica y semántica. Los resultados mostraron diferencias significativas en las 9 tareas que requerían una mayor intervención de la memoria semántica mientras que en las tareas puramente fonológicas o sintácticas no se encontraron diferencias significativas. Además de la detección de las diferencias significativas ya apuntadas, los autores utilizaron un análisis de regresión lineal para comprobar la capacidad de diagnóstico de cada una de las tareas y sus posibles combinaciones. Los resultados muestran un 90 % de sensibilidad y un 85 % de especificidad en el mejor de los casos. Estos valores superan el límite del 80 % a partir del cual se considera que un test es aceptable y, lo que es más importante, se superan utilizando sólo información lingüística (cuando la mayoría de tests combinan distintos tipos de información y distintos tipos de herramientas para alcanzar valores similares). Este hecho muestra el alto potencial de los tests del lenguaje como herramientas de ayuda al diagnóstico de la EA y motiva el uso de uno de estos tests en este trabajo de tesis.

Por último, al igual que en el caso del TEL, también se han utilizado medidas del habla espontánea para evitar los problemas de los tests de lenguaje. Algunos autores [Snowdon

et al., 1996; Bucks et al., 2000] han estudiado el poder predictivo de distintas medidas obtenidas a partir de las muestras de habla espontánea como la densidad de cada una de las clases gramaticales o varios índices relativos a la complejidad del lenguaje utilizado. Bucks et al. [2000] encontraron diferencias significativas en varias medidas entre las que destacan la baja tasa de sustantivos utilizados por el grupo de pacientes con posible EA, en línea con las observaciones de reducción del vocabulario comentadas anteriormente. Su estudio mostró un 87.5 % de acierto en la clasificación de un grupo de 24 individuos mediante un análisis discriminante lineal. Snowden et al. [1996] fueron un paso más allá, tratando de detectar el Alzheimer en una etapa presintomática. En su estudio llegaron a encontrar que una de las medidas obtenidas, la *densidad de ideas* (relacionada con la capacidad de abstracción), era un muy buen predictor del desarrollo del Alzheimer aún en esa etapa extremadamente temprana.

7.1.2.2. Técnicas de Inteligencia Artificial

La mayor parte de las técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje automático aplicadas al diagnóstico del Alzheimer se basan en la clasificación de imágenes cerebrales tomadas mediante resonancia magnética (MRI) o tomografía por emisión de positrones (PET). Un amplio resumen de estas técnicas puede verse en Gray [2012]. La sensibilidad y especificidad de estas técnicas superan en muchos casos las de los tests neuropsicológicos, alcanzando valores cercanos al 90 % incluso en los casos más leves [Gray, 2012]. Sin embargo, estas técnicas tienen como principal inconveniente su alto coste asociado. Para evitar ese problema, algunos autores han propuesto el uso de la señal de electroencefalografía (EEG). Lehmann et al. [2007] usan distintas técnicas de aprendizaje automático para el diagnóstico del Alzheimer a partir de la señal de EEG. Sus resultados muestran la utilidad de las distintas técnicas de aprendizaje automático, que mejoran la clasificación en más de un 7 % en todos los casos con respecto al análisis discriminante lineal clásico con tests del lenguaje y en más de un 3 % con respecto al análisis discriminante lineal a partir de la señal de EEG.

A pesar del potencial como herramienta de diagnóstico que han mostrado los tests neuropsicológicos del lenguaje, el trabajo en el área del aprendizaje automático a partir de muestras de lenguaje ha sido muy limitado. Principalmente se ha trabajado en el análisis automatizado de muestras de habla espontánea. En el trabajo que se ha comentado de Bucks et al. [2000], el análisis de las componentes principales (PCA) reveló la importancia de las medidas de vocabulario y las medidas de cohesión semántica en la caracterización y diagnóstico de pacientes con posible EA. Thomas et al. [2005] aplicaron distintas técnicas de aprendizaje automático usando las mismas medidas lingüísticas de Bucks et al. [2000]

para la detección de la EA y sus distintos niveles de afectación. Los resultados mostraron la adecuación de un enfoque que combina la información obtenida a partir de las muestras de habla espontánea con distintas técnicas de aprendizaje automático. Recientemente, esta adecuación ha sido también demostrada incluso para la clasificación de pacientes presintomáticos [Jarrold et al., 2010]. Los resultados de clasificación alcanzaron el 73 % de acierto. Un valor muy elevado teniendo en cuenta que se da en una época muy temprana, que permitiría un tratamiento mucho más adecuado y eficaz.

Como en el caso del TEL, el repaso de la bibliografía existente justifica la utilización de dos de los pilares de la metodología propuesta en este trabajo de tesis: el uso del lenguaje como fuente de información conductual y el uso de técnicas de aprendizaje automático para la ayuda al diagnóstico. El uso de tests del lenguaje como medida del comportamiento viene avalado por el alto potencial demostrado tanto en inglés como en castellano [Stevens et al., 1996; Bucks et al., 2000; Cuetos et al., 2003]. En concreto, el uso de la morfología verbal está justificado por la ausencia de trabajos en ese sentido en castellano y por las diferencias ampliamente significativas ya encontradas en italiano [Walenski et al., 2009]. En cuanto a las técnicas de aprendizaje automático, la bibliografía existente muestra, como en el caso del TEL, que sus resultados superan a los de las técnicas estadísticas clásicas (como el análisis discriminante lineal) [Lehmann et al., 2007]. A diferencia del TEL, en este caso existen técnicas (MRI, PET etc.) que permiten acceder de algún modo a las estructuras que provocan el trastorno. Sin embargo, su alto coste hace que todavía no puedan ser utilizadas masivamente. Una alternativa es la propuesta que se hace en este trabajo de tesis: el uso del modelado computacional cognitivo como herramienta de acceso a las estructuras y procesos subyacentes a un determinado comportamiento.

7.2. Aplicación de la metodología propuesta al Alzheimer

El estudio de la Enfermedad de Alzheimer en este trabajo de tesis viene motivado por dos razones fundamentales: en primer lugar se trata de mostrar el potencial de la metodología propuesta como método de ayuda al diagnóstico de un trastorno no directamente relacionado con el lenguaje. Como se ha señalado en la introducción, uno de los objetivos de este trabajo es presentar una metodología de carácter general, no restringida a un único trastorno cognitivo. Además, como se ha señalado en la sección anterior, a día de hoy, se mantiene la necesidad de encontrar técnicas de diagnóstico para la EA no invasivas y de bajo coste [Jarrold et al., 2010]. Este hecho justifica también el estudio del Alzheimer en este trabajo de tesis. Por otra parte, el hecho de utilizar el modelo presentado en la primera parte de esta tesis para modelar un trastorno de la etapa adulta muestra la ca-

pacidad del modelo tanto para imitar los mecanismos de adquisición durante el proceso de desarrollo como los mecanismos de procesamiento del lenguaje en dicha etapa. De este modo, el objetivo de este capítulo es también mostrar la generalidad del modelo propuesto y dar un paso más, por tanto, en su validación.

7.3. Detección de diferencias a nivel conductual

Como se ha comentado al principio del capítulo, la morfología verbal es una de las áreas afectadas en los pacientes de EA desde la primera etapa del desarrollo de la enfermedad. En la mayoría de estudios se han observado dificultades para la producción correcta de formas irregulares mientras que la producción de formas regulares no se ve afectada. Estos efectos han sido ampliamente estudiados en inglés [Ullman et al., 1997; Ullman, 2004; Cortese et al., 2006] y en idiomas similares al castellano como el italiano [Walenski et al., 2009]. Sin embargo, no existe un estudio exhaustivo en castellano sobre la producción de formas verbales en individuos con posible EA. Por tanto, se decidió diseñar y realizar un experimento preliminar en este sentido. Para ello se contó con la colaboración del personal del Centro de Referencia Estatal de Discapacidad y Dependencia de San Andrés del Rabanedo (León), donde fueron recogidos los datos. A continuación se detalla el experimento en cuestión.

7.3.1. Sujetos

El estudio contó con 22 participantes castellanoparlantes divididos en dos grupos: grupo de individuos con posible Enfermedad de Alzheimer (pEA) y grupo de individuos sanos. El grupo pEA fue constituido por 12 pacientes (6 mujeres y 6 varones) con posible Alzheimer con edad media y desviación típica de 73,25 (7.78) años y estudios primarios completados en todos los casos menos uno. De ellos se descartaron tres pacientes por distintas razones que se consideraron de relativa importancia para los objetivos del estudio. Uno de los participantes no había estado escolarizado, en otro de los casos la lengua materna del participante era el francés y, en el tercer caso, el participante fue descartado por su elevada edad y bajo nivel educativo. Tras la supresión de estos tres pacientes, el grupo pEA quedó formado por 9 pacientes (4 mujeres y 5 varones) con una edad media y desviación típica de 69,33 (6,42) años. Como grupo control se utilizó un grupo de 10 individuos adultos sanos (5 mujeres y 5 varones) con una edad media y desviación típica de 67,3 (2,58) años (no significativamente diferente de la edad media del grupo pEA $p = 0,55$). Un resumen de las características de los dos grupos utilizados puede verse en la tabla 7.1.

Tabla 7.1: Resumen de las características de los grupos de participantes utilizados en el estudio de la morfología verbal en pacientes con posible Alzheimer.

	pEA	control
Participantes	9	10
Edad	69,33 (6,42)	67,3 (2,58)
Sexo	4M / 5V	5M / 5V

7.3.2. Diseño y procedimiento

El experimento consistió en una *entrevista dirigida* sobre formas verbales en presente simple y pasado simple. Para cada una de esas dos subtarear se utilizaron 20 verbos regulares y 20 irregulares. Como en estudios similares [Walenski et al., 2009], los grupos de verbos regulares e irregulares se seleccionaron de modo que ambos grupos estuvieran igualados en frecuencia del infinitivo (regulares: 44,79, irregulares: 44,33; $p = 0,98$). Las estimaciones de frecuencia se obtuvieron del *Corpus de Referencia del Español Actual* [RAE, 2012]. Todos los verbos regulares, salvo uno (*comer*) pertenecen a la primera conjugación, mientras que todos los verbos irregulares utilizados pertenecen a la segunda o tercera conjugación. Los verbos regulares e irregulares también fueron seleccionados de modo que ambos grupos estuvieran igualados en longitud tanto ortográfica (Número de letras. Infinitivos: regulares: 6,4, irregulares: 5,85; $p = 0,29$. Formas conjugadas: regulares: 5,48, irregulares: 5,58; $p = 0,74$) como fonológica (Número de sílabas. Infinitivos: regulares: 2,4, irregulares: 2,25; $p = 0,41$. Formas conjugadas: regulares: 2,4, irregulares: 2,35; $p = 0,69$). Por último, se tuvo en cuenta la densidad de consonantes de las formas utilizadas. Esta medida captura la complejidad fonológica de las formas verbales. De este modo, se evitó que factores fonológicos pudieran influir en los resultados del experimento. Los verbos regulares e irregulares no presentaron diferencias significativas en cuanto a la densidad de consonantes de sus infinitivos (regulares: 1,62, irregulares: 1,57; $p = 0,62$) ni de las formas conjugadas (regulares: 1,18, irregulares: 1,24; $p = 0,43$).

Cada uno de los 40 verbos utilizados en la tarea de presente se mostraron en pares de frases con la siguiente estructura:

A mí me gusta llevar pantalones vaqueros.

Así que todos los días ----- pantalones vaqueros.

Todas las frases se presentaron en primera persona del singular y acompañadas de un adverbio o locución adverbial de frecuencia que denota que la acción se realiza habitualmente (así queda claro para el participante que el tiempo correcto es el presente).

Para la tarea de pasado simple se construyeron otros 40 pares de frases con una estructura similar a:

A Paula le gusta comer temprano.

Así que ayer Paula _____ temprano.

En este caso, todas las frases se presentaron en tercera persona del singular y acompañadas por el adverbio “ayer” para denotar inequívocamente el tiempo de pasado simple. Una lista completa de los 80 pares de frases utilizados puede verse en el apéndice D.

Los 80 pares de frases resultantes fueron mezclados y presentados aleatoriamente a los pacientes utilizando el mismo orden para todos ellos. A cada uno de los pacientes se le pidió que leyera detenidamente cada par de frases y rellenara el hueco de la segunda frase con la forma verbal adecuada del mismo verbo utilizado en la primera frase. Como ejemplo se les proporcionó el siguiente par de frases:

A Juan le gusta leer el periódico por las mañanas.

Así que ayer Juan -----LEYÓ----- el periódico por la mañana.

Las respuestas obtenidas se clasificaron en cinco tipos diferentes:

- Respuestas correctas
- Errores de irregularización/sobrerregularización: En los casos en los que la forma esperada era regular, se midieron los errores de irregularización y en los casos en los que la forma esperada era irregular se midieron los errores de sobrerregularización.
- Errores de número o persona: Errores producidos por la sustitución del sufijo correcto por un sufijo con características de número o persona diferentes.
- Errores de modo, tiempo o aspecto: Errores producidos por la sustitución del sufijo correcto por un sufijo con características de modo, tiempo o aspecto diferentes.
- Otros errores: Cualquier error no englobado en ninguna de las categorías anteriores.

7.3.2.1. Resultados

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 7.2. Para comprobar la significación estadística de los resultados se llevaron a cabo dos tests estadísticos. En primer lugar se realizaron varios tests *t de Student* para comprobar si existen diferencias estadísticamente

significativas en la producción de formas regulares e irregulares dentro del grupo pEA tanto en presente como en pasado. En segundo lugar, se realizaron varios tests *t de Student* para comprobar si existen diferencias significativas entre los distintos resultados del grupo pEA y el grupo control (los resultados de estos tests también se muestran en la tabla 7.2).

Tabla 7.2: Resultados del experimento sobre la morfología verbal en pacientes con posible Alzheimer (pEA) e individuos de control.

		pEA	control	
Presente simple	Formas regulares	Correctos	0.983	0.995
		Irregularización	0	0
		Errores NP	0	0
		Errores MTA	0.006	0
		Otros Errores	0.013	0.005
	Formas irregulares	Correctos	0.911**	0.985
		Sobrerregularización	0.028*	0.01
		Errores NP	0	0
		Errores MTA	0.039*	0
		Otros Errores	0.022	0.005
Pasado simple	Formas regulares	Correctos	0.978	0.99
		Irregularización	0	0
		Errores NP	0	0
		Errores MTA	0.011	0.005
		Otros Errores	0.011	0.005
	Formas irregulares	Correctos	0.9**	0.98
		Sobrerregularización	0.039	0.02
		Errores NP	0.006	0
		Errores MTA	0.033**	0
		Otros Errores	0.022*	0

*, ** Diferencia significativa entre el grupo pEA y el grupo control usando un test t de dos colas *($p < 0,05$), **($p < 0,01$)

En el caso del presente simple, los pacientes con posible Alzheimer mostraron un déficit en la producción de formas irregulares correctas. La diferencia en el porcentaje de producción de formas regulares correctas (0,983) frente al porcentaje de formas irregulares correctas (0,911) es estadísticamente significativa ($p < 0,01$). Al analizar las diferencias con el grupo de control también se encontraron resultados distintos para los dos tipos de formas verbales. La producción de formas irregulares por parte del grupo pEA es significativamente peor que la del grupo de control (0,911 frente a 0,985 respectivamente, $p < 0,01$) mientras que en el caso de las formas regulares no se encontró tal diferencia.

Los resultados obtenidos para las formas en pasado simple confirman lo observado en el presente: El grupo pEA presenta un marcado déficit en la morfología irregular. La comparación entre la producción de formas regulares e irregulares dentro del grupo pEA muestra una diferencia significativa ($p < 0,01$) en favor de las formas regulares (0,978 frente a 0,9). Por su parte, el análisis entre los dos grupos muestra también una clara diferencia significativa ($p < 0,01$) en el caso de las formas irregulares (0,9 del grupo pEA frente a 0,98 del grupo de control), mientras que en el caso de las formas regulares no se encontró tal diferencia.

En cuanto a los distintos tipos de errores cometidos por los pacientes con posible Alzheimer destacan los errores de sobrerregularización y los errores de sustitución de modo, tiempo o aspecto. Tanto en presente como en pasado se encuentran diferencias significativas en la producción de estos errores de sustitución frente al grupo de control. En el caso de las sobrerregularizaciones, tan sólo se encontró una diferencia significativa en el caso de las formas de presente. Sin embargo, es posible que el hecho de que esa diferencia no se observe en las formas de pasado sea debido únicamente al limitado número de pacientes y de formas verbales utilizadas.

7.3.3. Discusión

Los resultados muestran un claro déficit en la producción de formas irregulares en los pacientes con posible Alzheimer. Este resultado está en línea con los mostrados en otros trabajos similares tanto en inglés [Ullman et al., 1997; Ullman, 2004; Cortese et al., 2006] como en italiano [Walenski et al., 2009]. En particular, los resultados son muy similares a los obtenidos en ese último trabajo en italiano. Este hecho era de esperar dadas las similitudes entre los dos idiomas. Por otra parte, los resultados coinciden con las predicciones realizadas por el modelo declarativo/procedural. Como ya se ha comentado, el Alzheimer afecta a estructuras del lóbulo temporal, dejando intactas el área de Broca y el ganglio basal. Por lo tanto, el modelo DP predice problemas en la memoria declarativa que es la encargada de almacenar las formas irregulares. Del mismo modo predice la ausencia de problemas en la flexión de formas regulares. Aunque algunas de las formas regulares pueden ser almacenadas en la memoria declarativa, éstas son precisamente las más frecuentes y, por tanto, las que corresponden a unas reglas con una mayor activación. Así pues, aunque la memoria declarativa fallase al tratar de recuperar estas formas, es muy probable que exista una regla regular capaz de conjugar correctamente esas formas. Por la misma razón, el modelo DP predice que un alto porcentaje de los errores producidos en las formas irregulares ha de consistir en errores de sobrerregularización. Ante la incapacidad de la memoria declarativa de flexionar determinadas formas irregulares, la memoria procedural

aplicaría la regla regular correspondiente. Sin embargo, el alto porcentaje de sustituciones de modo, tiempo o aspecto detectados en este experimento puede resultar sorprendente. Como se vio en el capítulo 2, el modelo DP propone que la memoria declarativa no almacena únicamente las palabras como unidades atómicas sino que se almacenan también sus significados, sonidos y características gramaticales abstractas. De este modo, el déficit propuesto en la memoria declarativa podría afectar a estas representaciones y, en particular, a las características gramaticales como modo, tiempo o aspecto. Por tanto, este último resultado que puede parecer sorprendente es, de hecho, consistente con el modelo DP.

Por último, cabe resaltar que este estudio es en sí mismo una aportación más de este trabajo de tesis puesto que no existe ningún estudio similar en Castellano. Por sus características tanto en número de individuos como en número y tipos de verbos estudiados podría ser considerado un estudio preliminar. Sin embargo, a pesar de sus limitaciones los resultados obtenidos permiten observar diferencias significativas que pueden ser de gran utilidad para el estudio de la relación entre el Alzheimer y la morfología verbal en Castellano.

7.4. Modelado cognitivo

En esta etapa de la metodología se utilizará el modelo presentado en el capítulo 4 que ya se utilizó en el capítulo anterior. La principal diferencia que presenta el Alzheimer es que no es un trastorno del desarrollo sino un trastorno en la edad adulta. Por tanto, es necesario ajustar el modelo a dicha edad antes de comenzar la simulación. Resulta evidente que, en la edad adulta, las activaciones de las distintas formas verbales en la memoria declarativa son altas y estables. Este hecho se simuló introduciendo en la memoria declarativa todas las formas verbales involucradas en el estudio con un determinado valor de activación. Como se verá en la siguiente sección, este parámetro fue incluido dentro del espacio de búsqueda de la estrategia evolutiva para obtener su valor óptimo. Además de esta modificación, tanto el vocabulario como el procedimiento utilizado en el experimento difieren de los presentados en el capítulo 4.

Vocabulario: Dado que, en este caso, tanto los verbos utilizados en la etapa anterior como sus frecuencias de uso son conocidos, el vocabulario utilizado estuvo formado por esos mismos verbos: 20 verbos regulares y 20 verbos irregulares extraídos del *Corpus de Referencia del Español Actual* [RAE, 2012] y por tanto, comparten las características señaladas en la sección 7.3.2.

Procedimiento: El procedimiento simula el utilizado para recoger los datos empíricos. Cada una de las formas verbales involucradas es presentada en orden aleatorio al modelo en infinitivo y se le pide que lo conjugue en presente o pasado. La única diferencia entre este experimento y el realizado con los sujetos humanos consiste en que los individuos han de inferir la combinación correcta de características gramaticales que han de producir a partir del contexto de la oración. Por ejemplo, en las oraciones de pasado, han de inferir que tienen que producir un verbo en pasado a partir de la presencia del adverbio “ayer” y han de inferir que deben producir un verbo en tercera persona del singular a partir del nombre o pronombre presente en la oración. Los errores que pudieran provocarse en esa etapa se modelan a través del ruido en la percepción de las características morfológicas explicado en el capítulo 4. Este ruido se mantuvo estable durante todo el experimento puesto que, en este caso, no se pretenden modelar los procesos de desarrollo que se dan en los niños. Por lo tanto, el parámetro $\gamma_m - dec$ no fue utilizado.

7.5. Individualización de los parámetros del modelo

Como ya se ha comentado, en este trabajo de tesis se apuesta por el modelado del individuo frente al estudio del perfil de comportamiento promedio. Esta etapa de la metodología permitirá detectar en la siguiente etapa las causas del trastorno en cada uno de los individuos y los grados en que afecta cada una de esas causas a cada individuo. Esto permite que nuestra metodología emita no sólo un diagnóstico binario sino un diagnóstico individualizado y detallado que podría ser de gran ayuda en el diseño de terapias individualizadas. Por tanto, como ya se ha comentado, en esta etapa se utilizará una estrategia evolutiva [Beyer y Schwefel, 2002] para obtener las combinaciones de los valores de los parámetros que permiten que el modelo computacional cognitivo se adapte mejor a cada uno de los comportamientos observados para los 22 individuos de la base de datos usada.

7.5.1. Procedimiento

Los operadores y parámetros utilizados serán los mismos que se utilizaron en el capítulo anterior (sección 6.5). Por tanto, en este punto se definirá tan sólo el espacio de búsqueda.

7.5.1.1. Definición del espacio de búsqueda

Como se ha comentado, la definición del espacio de búsqueda consiste en este caso en seleccionar los parámetros del modelo a optimizar y acotar los posibles valores que estos parámetros pueden tomar. Los parámetros a optimizar y sus rangos permitidos son los mostrados en la tabla 7.3

Tabla 7.3: Definición del espacio de búsqueda en la aplicación de la metodología a la EA. Atributos utilizados y rango de valores permitido.

Tipo	Atributo	Rango
Memoria declarativa	RT	$-0,02 \pm (5 \cdot 0,62)$
	ANS	$0,43 \pm (5 \cdot 0,34)$
	BLL	$0,4 \pm (5 \cdot 0,31)$
	A_0	$-0,02 \pm (5 \cdot 0,62)$
Memoria procedural	α	$0,2 \pm (5 \cdot 0,03)$
	EGS	$0,13 \pm (5 \cdot 0,46)$
Procesamiento gramatical	γ_m	$0,1 \pm 0,5$
	Conj-PM	$-2,8 \pm 5$
	NP-PM	$-3,6 \pm 5$
	MTA-PM	-3 ± 5

Los parámetros relacionados con la memoria declarativa se han incluido en el estudio puesto que es ampliamente aceptado que existe un déficit en este área. Además, como se ha comentado en la sección anterior, se ha añadido un parámetro de activación inicial A_0 que refleja el grado de activación que poseen las formas verbales en el momento de empezar la simulación. Los parámetros relacionados con el procesamiento gramatical se incluyeron puesto que, como se ha apuntado en la sección 7.3, algunos de los errores encontrados sugieren problemas con la representación y el procesamiento de las características gramaticales. En este caso, el parámetro de decaimiento del ruido $\gamma_m - dec$ no ha sido tenido en cuenta puesto que su objetivo era simular la mejora que se produce en la percepción y el procesamiento de las características gramaticales a lo largo del desarrollo. Dado que en este experimento no se trata de modelar el proceso de desarrollo, su inclusión no es necesaria. Los parámetros relacionados con el procesamiento fonológico no fueron incluidos en el estudio. Como se vio en la sección 7.1.1, la fonología es una de las áreas que parece estar preservada en la EA. A pesar de que algunos estudios muestran ciertos problemas [Croot et al., 2000], éstos han sido detectados siempre en pacientes con un grado de afectación moderado. Los pacientes involucrados en el estudio presentado aquí se encuentran en una etapa muy prematura del trastorno y, por tanto, no deberían presentar ningún problema a nivel fonológico. Además, se mantuvieron en el estudio los parámetros relacionados con la memoria procedural puesto que tienen una influencia directa en el comportamiento del modelo en esta tarea en cuestión.

A la hora de acotar los valores de estos parámetros se siguió el mismo criterio que en el experimento anterior y, por tanto, se utilizaron los mismos valores en todos los casos salvo en uno. En el experimento del TEL, no se tomó el valor del parámetro α de la base

de datos de Wong et al. [2010] alegando que el modelo pretende modelar el proceso de desarrollo a diferencia de los modelos incluidos en la base de datos. Sin embargo, en el caso de la EA, el modelo no es utilizado para simular el proceso de desarrollo sino para simular el experimento de recogida de datos, una tarea perfectamente localizada en el tiempo. Por tanto, en este caso se usará el valor recogido en la base de datos de Wong et al. [2010]. En el caso del parámetro de activación inicial A_0 , se tomó un rango igual al del umbral de recuerdo (RT). De este modo, se permite que el valor de A_0 pueda estar por encima del umbral de recuerdo como correspondería a un adulto sano y además se permiten valores más reducidos que podrían ser característicos de la EA incluso en su etapa más temprana.

7.5.2. Resultados

Al igual que en el caso anterior, los valores óptimos para cada parámetro se calcularon como el valor medio obtenido en 10 ejecuciones de la estrategia evolutiva, la cual convergió en todos los casos a una zona del espacio de búsqueda muy similar tras 200 generaciones (condición de parada). La correlación entre el vector de porcentajes de tipos de error observados en los adultos y los observados en el modelo fue de 0.92, valor que muestra el elevado grado de ajuste conseguido. Igualmente, no se ha prestado una especial atención a la eficiencia en tiempo del método puesto que, como se comentó en el capítulo anterior, no es un punto demasiado relevante en nuestra aplicación.

7.6. Aplicación de técnicas de aprendizaje automático

El objetivo de esta etapa de la metodología es comprobar dos de las hipótesis de este trabajo de tesis. En este caso no tiene sentido aplicar las técnicas de agrupamiento que se han comentado en los dos capítulos anteriores. No existen teorías bien definidas que puedan ser apoyadas o refutadas a través de la información dada por los parámetros del modelo y tampoco han sido propuestos distintos subgrupos dentro de la EA que puedan ser definidos a través de los parámetros utilizados por el modelo. Por tanto, se tratará de demostrar las otras dos hipótesis planteadas en el capítulo anterior (que, como se ha comentado, se derivan de la hipótesis principal y las hipótesis secundarias planteadas en el capítulo 1):

- Las variables obtenidas a partir del modelado computacional cognitivo poseen una capacidad informativa y discriminatoria mayor que la de las variables conductuales.
- El uso de técnicas avanzadas de clasificación a partir de la información obtenida a través del modelado computacional cognitivo permite obtener mejores resultados en términos de ayuda al diagnóstico.

Tabla 7.4: Atributos utilizados en la aplicación de la metodología a la EA.

Subconjunto	Tipo	Atributo	Índice
Observables	Presente- Regular	% Correctos-PresReg	1
		% Irreg.-PresReg	2
		% NP-PresReg	3
		% MTA-PresReg	4
		% Otros-PresReg	5
	Presente- Irregular	% Correctos-PresIrreg	6
		% Sobrerreg.-PresIrreg	7
		% NP-PresIrreg	8
		% MTA-PresIrreg	9
		% Otros-PresIrreg	10
	Pasado- Regular	% Correctos-PasReg	11
		% Irreg.-PasReg	12
		% NP-PasReg	13
		% MTA-PasReg	14
		% Otros-PasReg	15
	Pasado- Irregular	% Correctos-PasIrreg	16
		% Sobrerreg.-PasIrreg	17
		% NP-PasIrreg	18
		% MTA-PasIrreg	19
		% Otros-PasIrreg	20
Internos	Memoria declarativa	RT	21
		ANS	22
		BLL	23
		A_0	24
	Memoria procedural	α	25
		EGS	26
	Procesamiento gramatical	γ_m	27
		Conj-PM	28
		NP-PM	29
		MTA-PM	30

Para ello, se utilizan distintas técnicas de aprendizaje automático que usan la información obtenida a través de las variables conductuales observadas en la primera etapa de la metodología y la información obtenida a través de los parámetros internos del modelo computacional cognitivo obtenidos en las etapas 2 y 3. En concreto, los atributos utilizados por los distintos métodos aplicados en esta etapa se muestran en la tabla 7.4.

Siguiendo el diseño de esta etapa de la metodología, para comprobar las dos hipótesis comentadas, se aplicaron dos tipos de técnicas de aprendizaje automático: técnicas de ponderación de atributos y técnicas de clasificación. A continuación se muestran el procedimiento y los resultados obtenidos con cada uno de ellos. En todos los experimentos se utilizó la herramienta RapidMiner [Mierswa et al., 2006] usando la configuración de parámetros por defecto en todas y cada una de las técnicas utilizadas.

7.6.1. Ponderación de atributos

Como ya se ha comentado, una de las principales propuestas de la metodología planteada en este trabajo de tesis consiste en el uso de la información obtenida a partir del modelado computacional cognitivo frente al uso únicamente de información conductual. Con el objetivo de demostrar que la información interna del modelo tiene una mayor capacidad informativa y discriminatoria, se utilizaron distintas técnicas de ponderación de atributos que, como se ha visto, permiten ordenar los distintos atributos según su valía atendiendo a distintos criterios.

7.6.1.1. Procedimiento

Al igual que en el capítulo anterior, se usarán las técnicas de ponderación de atributos mostradas en la tabla 5.1. En todos los casos se utilizó la configuración de parámetros por defecto dada en la herramienta RapidMiner. Las distintas técnicas se aplicaron sobre el conjunto completo de atributos puesto que el objetivo es comparar la importancia de los dos tipos de atributos: observables e internos. Para la evaluación de los resultados se calculó el orden promedio de cada atributo usando las 5 técnicas propuestas. A partir de ahí se obtuvo el orden promedio de los dos tipos de fuentes de información con cada una de las técnicas y el orden promedio global con el objetivo de comprobar si existen diferencias significativas.

7.6.1.2. Resultados

La tabla 7.5 muestra el orden dado para cada atributo por las distintas técnicas utilizadas y el orden promedio de cada atributo. La figura 7.1 muestra gráficamente esos órdenes promedio con sus desviaciones típicas y el orden promedio de los dos grupos de atributos.

En primer lugar se puede observar la importancia de cada atributo dentro de su grupo. En el caso de las variables internas, existe una clara distinción entre las cuatro variables de mayor importancia y el resto. Esas cuatro variables tienen un orden promedio de 4,6 mientras que el resto tienen un orden promedio de 15,83. Esas cuatro variables de gran

Tabla 7.5: Ordenación de atributos dada por las distintas técnicas de ponderación de atributos utilizadas.

Subconjunto	Tipo	Atributo	Índice	Ganancia de información	Correlación	Estadístico Chi cuadrado	Ponderación por reglas	Ponderación por SVM	Promedio
Observables	Presente- Regular	% Correctos-PresReg	1	11	12	13	14	16	13.2
		% Irreg.-PresReg	2	27	26	30	25	28	27.2
		% NP-PresReg	3	28	25	26	30	26	27
		% MTA-PresReg	4	26	20	25	24	25	24
		% Otros-PresReg	5	16	19	20	19	17	18.2
	Presente- Irregular	% Correctos-PresIrreg	6	10	13	15	12	14	12.8
		% Sobrerreg.-PresIrreg	7	2	3	9	5	7	5.2
		% NP-PresIrreg	8	29	27	28	26	29	27.8
		% MTA-PresIrreg	9	7	2	4	6	8	5.4
		% Otros-PresIrreg	10	21	28	21	29	23	24.4
	Pasado- Regular	% Correctos-PasReg	11	17	10	8	7	4	9.2
		% Irreg.-PasReg	12	30	29	27	28	30	28.8
		% NP-PasReg	13	25	24	29	27	27	26.4
		% MTA-PasReg	14	22	14	12	17	12	15.4
		% Otros-PasReg	15	23	30	18	18	21	22
	Pasado- Irregular	% Correctos-PasIrreg	16	9	4	3	8	9	6.6
		% Sobrerreg.-PasIrreg	17	12	15	10	13	13	12.6
		% NP-PasIrreg	18	24	23	19	23	22	22.2
		% MTA-PasIrreg	19	1	5	2	2	11	4.2
		% Otros-PasIrreg	20	18	16	14	22	15	17
Internos	Memoria declarativa	RT	21	4	9	1	1	2	3.4
		ANS	22	5	6	11	4	3	5.8
		BLL	23	8	17	17	15	20	15.4
		A ₀	24	14	8	7	11	6	9.2
	Memoria procedural	α	25	19	18	23	20	24	20.8
		EGS	26	13	11	14	10	10	11.6
	Procesamiento gramatical	γ_m	27	3	1	6	3	1	2.8
		Conj-PM	29	15	22	16	16	18	17.4
		NP-PM	30	20	21	22	21	19	20.6
		MTA-PM	31	6	7	5	9	5	6.4

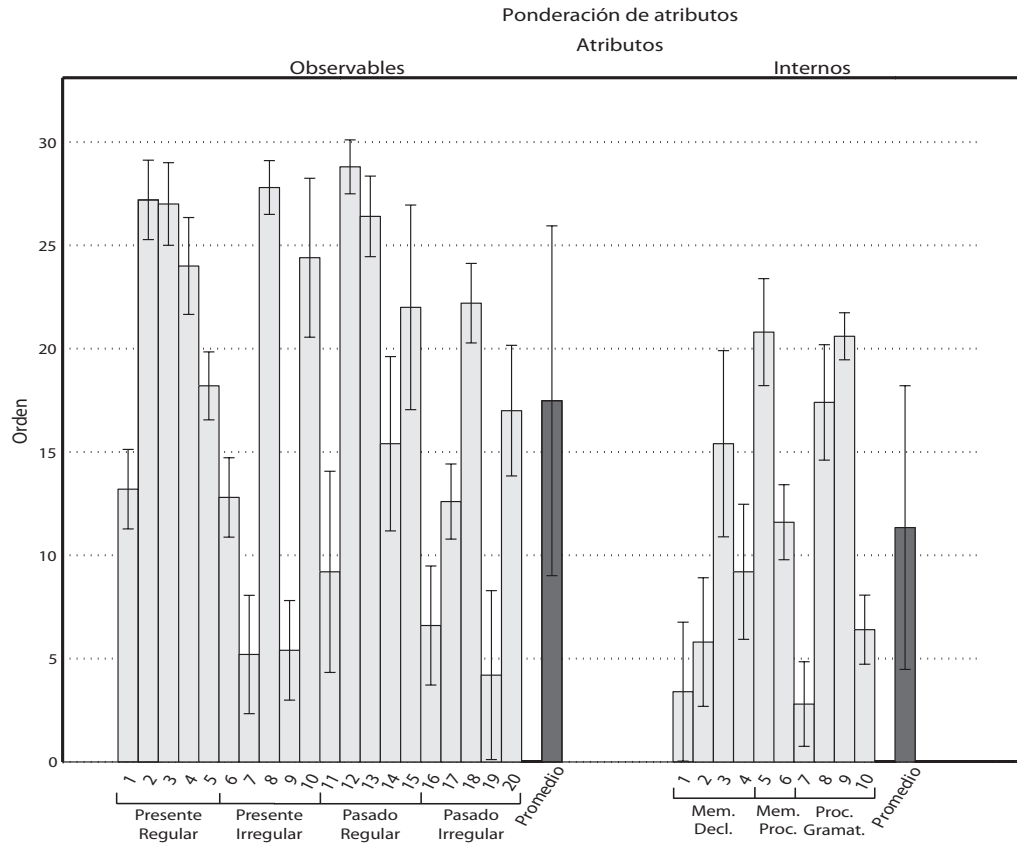


Figura 7.1: Orden promedio y desviación típica de cada uno de los atributos y de los dos grupos de atributos.

importancia están relacionadas con la memoria declarativa (parámetros RT y ANS) y dos de los parámetros relacionados con el procesamiento gramatical (parámetros γ_m y MTA-PM). En cuanto a las variables observables, los atributos más importantes son la sustituciones de modo, tiempo o aspecto tanto en el presente como en el pasado de las formas irregulares, la sobrerregularizaciones de formas de presente y el porcentaje de formas irregulares correctas de pasado.

Comparando el promedio de los dos grupos de atributos se observa una diferencia significativa ($p < 0,05$) usando un test t de dos colas: las variables internas obtienen un orden menor y son, por tanto, más informativas. Para ahondar en este hecho se muestra en la tabla 7.6 el orden promedio de cada grupo con las distintas técnicas utilizadas. Como se puede comprobar en tres casos, ganancia de información, ponderación por reglas y ponderación por SVM, el grupo de atributos internos tiene un orden promedio significativamente menor que el grupo de atributos observables.

Tabla 7.6: Orden promedio de cada grupo de atributos con las distintas técnicas de ponderación de atributos utilizadas en la aplicación de la metodología a la EA.

Subconjunto	Ganancia de información	Correlación	Estadístico Chi cuadrado	Ponderación por reglas	Ponderación por SVM	Promedio
Observables	17.9	17.25	16.65	17.75	17.85	17.48
Internos	10.7*	12	12.2	11*	10.8*	11.34*

*,** Diferencia significativa con el valor medio obtenido con las variables observables utilizando un test t de dos colas *($p < 0,05$), **($p < 0,01$)

7.6.1.3. Discusión

El objetivo de este experimento era demostrar que la información obtenida a partir del modelado computacional cognitivo puede tener una mayor capacidad informativa y discriminatoria que la obtenida a partir de la mera observación del comportamiento. Los resultados muestran claramente que esta hipótesis se cumple: los dos atributos más importantes pertenecen al grupo de variables internas y cuatro de los seis atributos más relevantes son atributos internos. De hecho, el grupo de variables internas obtiene un orden promedio significativamente menor con tres de los cinco métodos utilizados. Más aún, promediando los resultados de los cinco métodos, el resultado también es significativamente menor en el caso de las variables internas. Por tanto, se puede concluir que las variables internas tienen mayor valor informativo que las variables observables.

Además de la consecución del objetivo principal, los resultados aportan información sobre las posibles estructuras y mecanismos dañados en la EA. Las variables más importantes del subconjunto de variables internas muestran la importancia de los atributos relacionados con la memoria declarativa y el procesamiento de las características gramaticales. Como se comentó, este hecho sugiere que el área más afectada por la EA es la memoria declarativa. Y viene a apoyar el modelo declarativo/procedural, que propone que el Alzheimer está causado por un déficit en las estructuras de la memoria declarativa que almacenan no sólo las palabras sino también sus características gramaticales, afectando por tanto al procesamiento de las mismas.

7.6.2. Clasificación

Como en el caso del TEL, este experimento tiene un doble objetivo:

- Confirmar la importancia de las variables internas del modelo, que se ha podido observar mediante el uso de técnicas de ponderación de atributos. Para ello se comparará la capacidad de diagnóstico de las cuatro técnicas de clasificación utilizadas

usando el conjunto de variables observables, el conjunto de variables internas y el conjunto completo. Comparando los resultados obtenidos por cada clasificador con cada uno de estos conjuntos de datos se podrá comprobar si existe una mejora al usar la información interna del modelo.

- El segundo objetivo consiste en demostrar que el uso de técnicas avanzadas de clasificación permite mejorar los resultados en términos de ayuda al diagnóstico frente a los obtenidos por las técnicas de análisis clásicas. Para ello se compararán los resultados obtenidos por un clasificador clásico (LDA) y por las cuatro técnicas utilizadas usando cada uno de los conjuntos de variables.

Aunando los resultados de estos dos análisis independientes se podrá comprobar una de las hipótesis de este trabajo de tesis: *El uso de técnicas avanzadas de clasificación a partir de la información obtenida a través del modelado computacional cognitivo permite obtener mejores resultados en términos de ayuda al diagnóstico.*

7.6.2.1. Procedimiento

Como se comentó en el capítulo anterior, se usarán cuatro algoritmos distintos: una máquina de vector de soporte (SVM), un método Naïve Bayes (NB), un árbol de decisión (DT) y una red neuronal (NN). Cada uno de estos algoritmos será aplicado sobre los tres conjuntos de atributos ya que uno de los objetivos es comparar sus capacidades con cada uno de ellos. La configuración de parámetros utilizada en cada caso es la dada por defecto en la herramienta RapidMiner. Para comparar los resultados de estos cuatro clasificadores se eligió como método de referencia el análisis discriminante lineal que, como se ha visto, ha sido utilizado en varios trabajos anteriores tanto en inglés [Bucks et al., 2000; Lehmann et al., 2007] como en castellano [Cuetos et al., 2003]. El método de evaluación utilizado fue una validación cruzada *leave one out* (LOOCV). Dado que la base de datos con la que se trabaja es muy reducida, este método parece el más adecuado para obtener una medida adecuada de las capacidades de cada clasificador. A partir de esa validación cruzada se calcularon las cinco medidas de evaluación comentadas en la sección 5.1.1: sensibilidad, especificidad, tasa de probabilidad positiva, tasa de probabilidad negativa y área bajo la curva ROC (AUC). Por último, dados los dos objetivos planteados, se realizó un análisis de los resultados teniendo en cuenta las dos variables involucradas en este experimento: la fuente de información (variables observables, internas o ambas) y la técnica de procesamiento de esa información (clásica o técnicas de aprendizaje automático).

7.6.2.2. Resultados

Los resultados obtenidos con los 5 clasificadores y cada uno de los conjuntos de atributos se muestran en la tabla 7.7.

Tabla 7.7: Sensibilidad, especificidad, tasa de probabilidad positiva, tasa de probabilidad negativa y AUC obtenidos con los 5 métodos y los 3 subconjuntos de atributos utilizados en la aplicación de la metodología a la EA.

Subconjunto	Medida	SVM	NB	DT	NN	LDA
Observables	Sensibilidad	0.61	0.65	0.50	0.54	0.47
	Especificidad	0.64	0.73	0.54	0.63	0.62
	LR+	1.69	2.41	1.09	1.46	1.24
	LR-	0.61	0.48	0.93	0.73	0.85
	AUC	0.62	0.68	0.52	0.60	0.58
Internas	Sensibilidad	0.71	0.68	0.62	0.61	0.61
	Especificidad	0.77	0.77	0.63	0.74	0.70
	LR+	3.09	2.96	1.68	2.35	2.03
	LR-	0.38	0.42	0.60	0.53	0.58
	AUC	0.73	0.72	0.62	0.68	0.63
Completo	Sensibilidad	0.86	0.75	0.71	0.85	0.72
	Especificidad	0.81	0.79	0.79	0.81	0.80
	LR+	4.53	3.57	3.38	4.47	3.6
	LR-	0.17	0.32	0.37	0.19	0.35
	AUC	0.85	0.76	0.76	0.82	0.76

Para poder observar más fácilmente los resultados relacionados con los dos objetivos planteados, se presentan las gráficas siguientes. En cada una de las gráficas de la figura 7.2 se puede ver, para cada una de las 5 medidas estudiadas, los resultados obtenidos por los distintos clasificadores con cada subconjunto de atributos. De este modo es fácil confirmar la importancia de las variables internas del modelo. Los resultados obtenidos por los distintos clasificadores mejoran en casi todos los casos al utilizar la información de los parámetros internos del modelo (bien sola o bien acompañada de la información de las variables observables).

Por su parte, las gráficas de la figura 7.3 muestran, para cada uno de los subconjuntos, los resultados obtenidos en términos de cada una de las medidas por cada una de las técnicas empleadas. De este modo es fácil confirmar que el uso de técnicas avanzadas de clasificación permite mejorar los resultados frente a los obtenidos por las técnicas de análisis clásicas. Es importante señalar que en estas gráficas, los valores de tasa de probabilidad positiva y tasa de probabilidad negativa se muestran normalizados por motivos

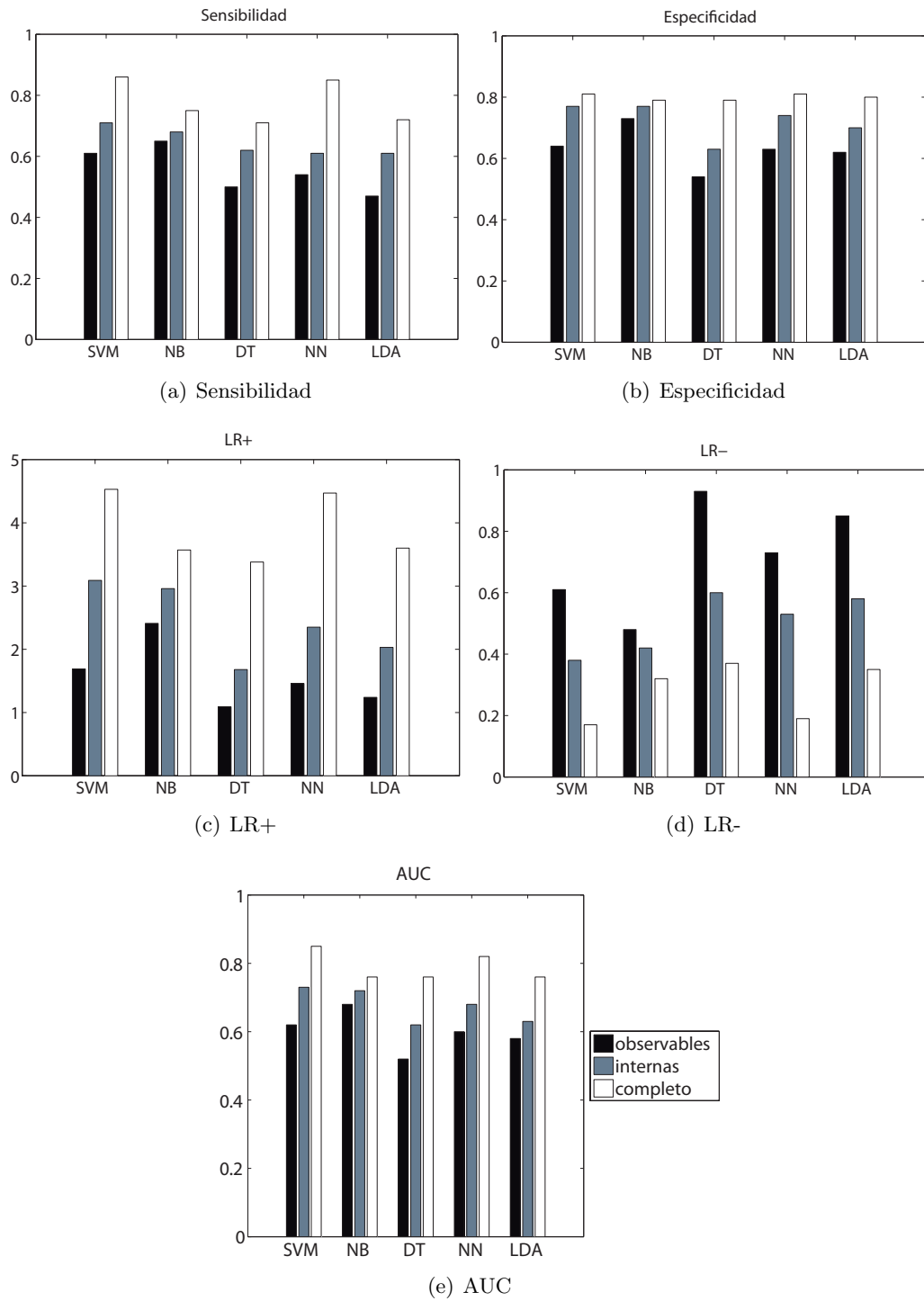


Figura 7.2: Resultados obtenidos por los distintos clasificadores con cada subconjunto de datos para cada una de las medidas de evaluación utilizadas.

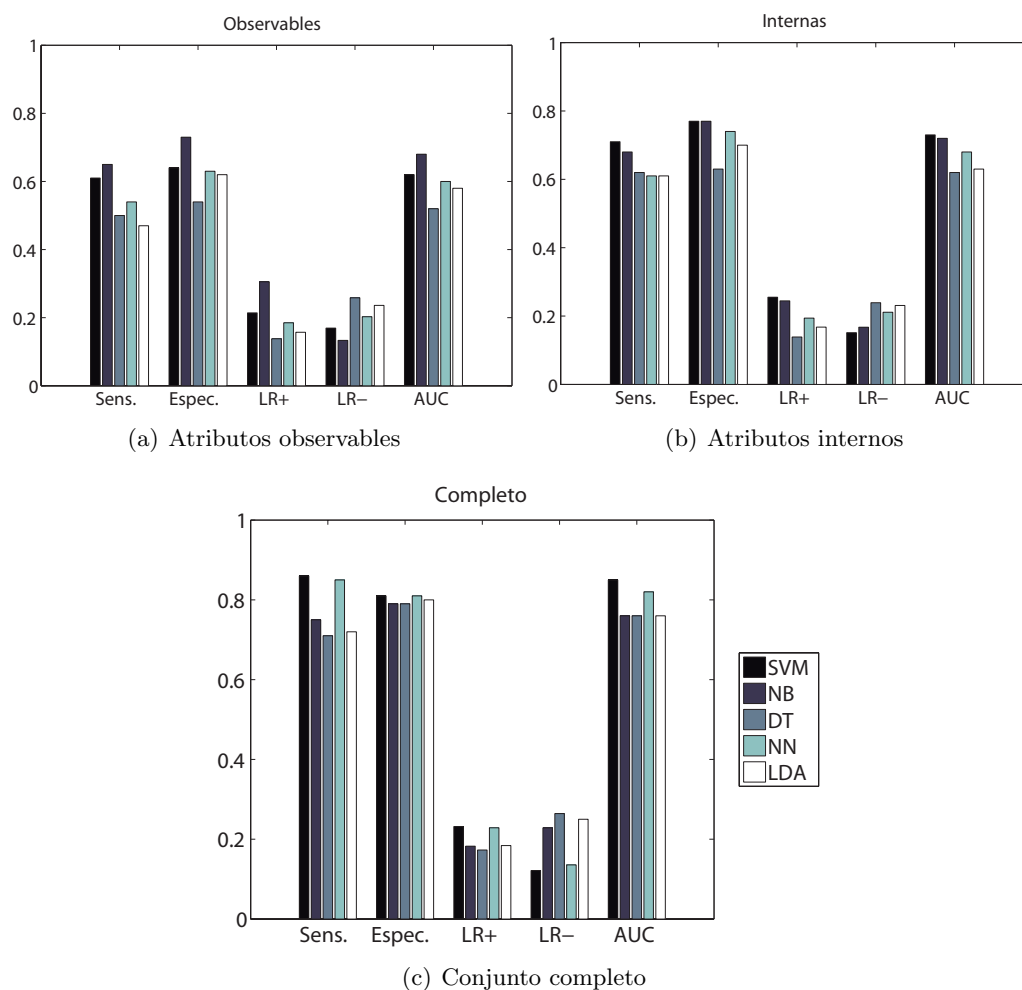


Figura 7.3: Resultados obtenidos por los distintos clasificadores en términos de cada una de las medidas de evaluación usadas con cada uno de los subconjuntos de atributos.

de escalado. En cualquier caso, la normalización no impide comprobar la relación relativa existente entre los distintos valores mostrados y, por tanto, permite su comparación.

Para comprobar la significación de los resultados que se han mostrado gráficamente se llevaron a cabo dos tests estadísticos. Es importante tener en cuenta que, dado el carácter preliminar de este estudio, el poder estadístico de los tests utilizados es bastante reducido. Sin embargo, a pesar de ello, se pudieron encontrar diferencias significativas. En primer lugar se realizó un test ANOVA de un factor para comprobar si la diferencia en los resultados de un mismo clasificador con los distintos conjuntos de atributos es estadísticamente significativa. Al usar el conjunto de variables internas se encontraron mejoras estadísticamente significativas en términos de sensibilidad en tres de los clasificadores: el SVM ($p < 0,05$), el

árbol de decisión ($p < 0,05$) y el análisis discriminante lineal ($p < 0,01$). Además el árbol de decisión y la red neuronal obtuvieron también mejoras en términos de especificidad ($p < 0,05$). Al comparar el conjunto de variables observables con el conjunto completo, las diferencias se incrementaron, siendo significativas en todos los casos ($p < 0,05$) en términos de sensibilidad, especificidad y área bajo la curva. En segundo lugar se realizó un test ANOVA de un factor para comprobar si las diferencias entre los distintos clasificadores y el método de referencia son significativas dentro de cada subconjunto de atributos. En el caso del conjunto de variables observables, se encontró una mejora significativa en términos de sensibilidad y AUC para el SVM y el método Naïve Bayes ($p < 0,05$) y en términos de especificidad para el método Naïve Bayes ($p < 0,05$). En el caso del conjunto de variables internas, también fueron estos dos clasificadores (SVM y Naïve Bayes) los que obtuvieron resultados significativamente mejores que el LDA en términos de sensibilidad, especificidad y AUC. Al utilizar el conjunto completo, tanto el SVM como la red neuronal superaron al LDA en términos de sensibilidad y AUC ($p < 0,01$). De este modo queda patente que en los tres casos se consiguen mejorar los resultados del método de referencia mediante el uso de técnicas de aprendizaje automático.

7.6.2.3. Discusión

Como se ha comentado, este experimento tenía como objetivos fundamentales:

- Confirmar la importancia de las variables internas del modelo que se obtuvo mediante el uso de técnicas de ponderación de atributos.
- Demostrar que el uso de técnicas avanzadas de clasificación permite mejorar los resultados en términos de ayuda al diagnóstico frente a los obtenidos por las técnicas de análisis clásicas.

A la vista de los resultados, estos dos objetivos han sido alcanzados y las hipótesis que plantean, confirmadas. En primer lugar resulta fácil ver que las variables internas del modelo aportan información relevante y, por tanto, hacen que los resultados de clasificación mejoren. Al utilizar únicamente el conjunto de variables internas, distintos clasificadores mejoraron en términos de sensibilidad y en términos de especificidad los resultados obtenidos con el conjunto de variables observables. Esta mejora es más evidente al observar los resultados obtenidos con el conjunto de variables completo. Todos los clasificadores mejoraron sus resultados en términos de sensibilidad, especificidad y AUC. Este hecho confirma, como se ha venido comentando en capítulos anteriores, que el uso exclusivo de variables conductuales no parece el enfoque más adecuado para el diseño de técnicas de ayuda al

diagnóstico de trastornos cognitivos. Sin embargo, los resultados también confirman que estas variables tienen utilidad y, por tanto, no deben ser descartadas.

La comparación de los resultados obtenidos con las cuatro técnicas de aprendizaje automático frente a los resultados del LDA permite comprobar la consecución del segundo objetivo. Con todos los subconjuntos de atributos se encontraron varios clasificadores que mejoraron los resultados obtenidos por el método de referencia y, en concreto, el SVM superó en todos los casos al LDA en términos de sensibilidad y AUC. Es importante resaltar que dos de los métodos (SVM y red neuronal) consiguen superar el 80 % de sensibilidad y especificidad apuntado por algunos autores como umbral a partir del cual un método de ayuda al diagnóstico puede ser considerado aceptable [Plante y Vance, 1994]. El método de referencia no consigue superar ese umbral en ninguno de los casos. Por tanto, se puede concluir, como en el capítulo anterior para el TEL, que el uso de técnicas de aprendizaje automático puede ser de gran utilidad para la ayuda al diagnóstico de trastornos cognitivos y, en particular, para la ayuda al diagnóstico de la EA.

A pesar de que los resultados confirman las dos hipótesis de partida de este experimento, resulta obvio que en el caso del TEL las diferencias encontradas fueron mucho más evidentes que en el caso de la EA. Esto puede deberse a varios motivos. En primer lugar, como se ha mencionado, este es un estudio preliminar con un número de sujetos y formas verbales reducido, lo cual limita el poder estadístico de los tests. De este modo, diferencias realmente significativas podrían haber escapado a la detección a partir de los tests estadísticos utilizados. En segundo lugar se debe tener en cuenta que el Alzheimer no es un trastorno que afecte específicamente al lenguaje y, por tanto, puede que fuera conveniente tener en cuenta otras áreas. El hecho de centrarnos en la morfología verbal viene dado por el interés de demostrar la generalidad del modelo presentado en la primera parte de la tesis y por el afán de confirmar que el lenguaje puede servir como termómetro para medir el estado de salud de distintas estructuras y procesos cognitivos. De todos modos, es importante resaltar que, a pesar de estas dificultades, se han demostrado las dos hipótesis y se ha conseguido que dos de los métodos superen los valores mínimos para considerar un método de ayuda al diagnóstico como aceptable, lo cual muestra la generalidad de la metodología propuesta y su potencial incluso al tratar con trastornos no relacionados con el lenguaje.

7.7. Discusión General

Los resultados obtenidos demuestran, como en el caso del TEL, las dos hipótesis claves en las que se basa la metodología propuesta en este trabajo de tesis:

- *Las variables obtenidas a partir del modelado computacional cognitivo poseen una capacidad informativa y discriminatoria mayor que la de las variables conductuales:* Esta hipótesis ha quedado demostrada mediante el uso de las técnicas de ponderación de atributos y las técnicas de clasificación:
 - Técnicas de ponderación de atributos: Tres de las técnicas de ordenación de atributos utilizadas otorgan un orden promedio significativamente menor al grupo de variables internas. Más aún, promediando los resultados de los cinco métodos, el resultado también es significativamente menor en el caso de las variables internas. Por tanto, se puede concluir que las variables internas tienen mayor valor informativo que las variables observables.
 - Técnicas de clasificación: El uso del conjunto completo de atributos lleva a todos los clasificadores a mejorar sus resultados en términos de sensibilidad, especificidad y AUC con respecto a los resultados obtenidos utilizando únicamente los atributos observables. Este hecho demuestra la capacidad informativa y discriminatoria de las variables internas.
- *El uso de técnicas avanzadas de clasificación a partir de la información obtenida a través del modelado computacional cognitivo permite obtener mejores resultados en términos de ayuda al diagnóstico que las técnicas clásicas como el análisis discriminante lineal:* Tanto el SVM como la red neuronal superaron al LDA (método tomado como referencia de los enfoques clásicos) en términos de sensibilidad y AUC. Además, esas técnicas superan, a diferencia del LDA, los criterios de eficacia comúnmente aceptados para considerar como aceptable un método de ayuda al diagnóstico. Por tanto, queda demostrado que la metodología propuesta puede abrir un camino hacia un método de diagnóstico de la EA no invasivo y de bajo coste.

Además, los experimentos realizados en este capítulo confirman la consecución de los dos objetivos generales que se planteaba la metodología:

- *Personalización:* La metodología ha de caracterizar y diagnosticar cada uno de los trastornos particularizando en las peculiaridades de cada individuo. Como se ha visto, nuestra metodología tiene en cuenta las diferencias individuales a través del modelado del individuo en lugar del modelado de un comportamiento promedio. Una

de las características más importantes de nuestra propuesta, derivada de ello, es que no ofrece simplemente un diagnóstico binario en términos de *afectado* o *no afectado*. Nuestra metodología da indicios (los valores de los parámetros) sobre qué áreas y mecanismos subyacentes están afectados por el trastorno y sobre el grado de afectación de cada uno de ellos. Este hecho puede ser de gran importancia para el diseño de terapias individualizadas que, presumiblemente, tendrían más facilidad para mitigar los efectos del trastorno.

- *Generalidad*: La metodología de caracterización y ayuda al diagnóstico ha de poder ser aplicada con éxito a distintos trastornos cognitivos. En este capítulo se ha demostrado la utilidad de la metodología propuesta con un trastorno no del lenguaje. Hecho que, unido a los resultados obtenidos en el capítulo anterior para el caso de un trastorno del lenguaje, confirma la generalidad de la metodología.

Por último es importante resaltar que estos experimentos confirman también la generalidad del modelo propuesto en la primera parte de este trabajo de tesis. Los buenos resultados obtenidos indican que el modelo no es capaz de imitar únicamente los procesos de adquisición y desarrollo de la morfología verbal sino también los procesos encargados de la flexión de las formas verbales en la etapa adulta.

Conclusiones

Bien podrán los encantadores quitarme la ventura, pero el esfuerzo y el ánimo, será imposible.

Miguel de Cervantes,
El ingenioso hidalgo Don Quijote de la Mancha.

Este capítulo recoge las conclusiones de este trabajo de tesis. En primer lugar se hace una recopilación del trabajo desarrollado. A continuación, se presenta un análisis de la consecución de los objetivos propuestos, un resumen de las aportaciones de esta tesis y un repaso a las líneas de investigación que este trabajo deja abiertas para el futuro.

8.1. Recapitulación

Este trabajo surge a partir de una serie de preguntas sobre cómo adquirimos y procesamos los seres humanos el lenguaje. Estas preguntas se abordaron en el marco general de las Ciencias Cognitivas dado que, como hemos visto, el estudio del funcionamiento del cerebro en general y del lenguaje en particular puede verse enriquecido por las aportaciones de múltiples ramas de la ciencia. Para realizar ese estudio de los mecanismos y estructuras subyacentes al procesamiento del lenguaje se propone el uso del modelado computacional cognitivo por sus múltiples ventajas a la hora de aunar y hacer explícitas las teorías pertenecientes a distintas áreas dentro de las Ciencias Cognitivas. Sin embargo, la implementación de un modelo computacional de procesamiento del lenguaje es, a día de hoy, inviable. De ahí que desde los inicios del modelado computacional se buscaran dominios reducidos que pudieran ser modelados y en los que las conclusiones extraídas pudieran generalizarse. El dominio elegido fue el de la morfología verbal ya que representa un caso relativamente simple y, a la vez, paradigmático del comportamiento general del lenguaje y, por tanto, las conclusiones obtenidas durante su estudio podrían ser extendidas, hasta cierto punto, a un ámbito más general.

En este contexto general se ha presentado en primer lugar un modelo computacional cognitivo de los procesos de adquisición de la morfología verbal. Este modelo está basado en el modelo Declarativo/Procedural, partiendo de las ideas de Ullman [2004] y Pinker [1994, 1999] e incorporando algunas de las ideas de propuestas más recientes como el enfoque de *múltiples reglas* [Albright y Hayes, 2003; Taatgen y Dijkstra, 2003]. El modelo recoge, a través del uso de ACT-R, la distinción clave del modelo DP entre memoria declarativa y memoria procedural. La memoria declarativa se encarga de la representación y aprendizaje de las formas verbales incluyendo sus significados, características gramaticales abstractas y su fonología (característica, esta última, obviada en la mayoría de modelos simbólicos). La memoria procedural almacena y adquiere las reglas regulares. Sin embargo, como propone el modelo DP, los mecanismos iniciales utilizados no son específicos del lenguaje sino que son compartidos por muchas otras tareas (como puede verse en muchos de los modelos ACT-R existentes hasta la fecha). Finalmente, estos dos sistemas interactúan también como propone el modelo DP. El sistema procedural abstrae las reglas regulares a partir de los ejemplos almacenados en la memoria declarativa. Ambos sistemas pueden recoger el mismo tipo de conocimiento: las formas regulares son también almacenadas en la memoria declarativa y pueden ser producidas sin necesidad de la intervención de reglas en caso de que tengan la suficiente activación. Por último, los dos sistemas interaccionan también de forma competitiva: si la memoria declarativa es capaz de encontrar la forma verbal buscada, se bloquea el uso de la memoria procedural. Además de las características generales del modelo DP, las principales características del modelo propuesto son su carácter translingüístico y su plausibilidad psicológica.

Para comprobar su validez, el modelo ha sido evaluado tanto en inglés como en castellano comparando su comportamiento con el comportamiento observado en los niños en distintos estudios empíricos. En todos los casos, el modelo ha mostrado un ajuste tanto cuantitativo como cualitativo a los datos empíricos. De hecho, el modelo supera algunas de las limitaciones de los modelos computacionales existentes para reproducir el comportamiento de los niños.

En la segunda parte de este trabajo se aborda la necesidad de métodos de diagnóstico adecuados para distintos trastornos cognitivos. La heterogeneidad y el solapamiento existente entre algunos trastornos cognitivos hacen que su diagnóstico y caracterización sean muy complicados. Los métodos utilizados actualmente suelen presentar tres limitaciones fundamentales. En primer lugar, estos métodos usan como única fuente de información ciertas observaciones conductuales. Dadas las características de heterogeneidad y solapamiento comentadas, el uso únicamente de información conductual puede no ser la opción

más adecuada. Por otra parte, en muchos casos se trata de estudiar el perfil de comportamiento promedio en lugar de centrarse en las diferencias individuales y tratar de explicar sus causas. De nuevo, dada la gran heterogeneidad, parece necesario un estudio individualizado de las causas que afectan a cada individuo y en qué grado afecta cada una de esas causas. Por último, las técnicas utilizadas en muchos casos para analizar esa información no son las más adecuadas por distintas razones. Por ejemplo, en muchos casos se trata de aplicar técnicas lineales en problemas no separables linealmente. Así pues, en este trabajo de Tesis se ha propuesto una metodología de ayuda a la caracterización y al diagnóstico de trastornos cognitivos no invasiva y de bajo coste, que trata de superar esas tres limitaciones fundamentales. En primer lugar, se propone el uso de información relativa a los procesos y estructuras que subyacen a cada uno de los perfiles de comportamiento y se propone el uso del modelado computacional cognitivo como herramienta para obtener esa información. En segundo lugar, se propone la individualización de esa información frente al estudio del perfil promedio. Por último, se propone el uso de técnicas de aprendizaje automático para obtener mejores resultados a partir de esa información.

Se ha evaluado la metodología en el caso del Trastorno Específico del Lenguaje. Los resultados muestran la validez de la metodología tanto en términos de caracterización como en términos de ayuda al diagnóstico. En cuanto a la caracterización, la combinación de las variables internas del modelo y las técnicas de agrupamiento ha permitido localizar tres subgrupos dentro del perfil general del TEL e identificarlos con las tres principales teorías acerca del TEL. En cuanto a la ayuda al diagnóstico, los resultados han superado significativamente a los resultados obtenidos por las técnicas clásicas para la identificación del TEL. Más aún, los resultados muestran que la metodología presentada supera los criterios comúnmente utilizados para considerar como aceptable un método de ayuda al diagnóstico.

Se ha evaluado la metodología en el caso de la Enfermedad de Alzheimer. Al igual que en el caso del TEL, los resultados en términos de ayuda al diagnóstico superan los obtenidos por los métodos clásicos y llegan a superar los criterios comúnmente utilizados para considerar como aceptable un método de ayuda al diagnóstico. De este modo, no sólo queda demostrada la validez de la metodología sino que también se demuestra su generalidad.

Dentro de la evaluación de la metodología en el caso de la EA, se diseñó y llevó a cabo un experimento empírico sobre el procesamiento de la morfología verbal en pacientes con posible alzheimer. Este estudio tiene valor por sí mismo puesto que no existía ningún

experimento similar hasta la fecha. Los resultados muestran que los pacientes con probable EA tienen dificultades con la morfología irregular mientras que la morfología regular se mantiene preservada.

Los resultados obtenidos en los experimentos de validación de la metodología con el TEL y la EA han permitido demostrar tanto la hipótesis principal como las hipótesis secundarias de este trabajo de tesis:

La información relativa a los procesos que subyacen a un determinado trastorno tiene una mayor capacidad informativa y discriminatoria que la información obtenida a través de la mera observación del comportamiento

- El modelado computacional cognitivo es una herramienta adecuada para conseguir dicha información.
- Las técnicas de aprendizaje automático son más adecuadas que las técnicas clásicas de análisis para analizar dicha información.

8.2. Consecución de objetivos

El desarrollo de este trabajo ha permitido cumplir los objetivos planteados al inicio del mismo y que se resumen a continuación:

1. **Se ha desarrollado un modelo computacional cognitivo de la adquisición de la morfología verbal.** El modelo cumple los requisitos planteados para que las conclusiones obtenidas a partir de él sean válidas y fiables:

- *Ajuste a los datos:* El modelo computacional cognitivo planteado da explicación a una amplia gama de datos recogidos empíricamente. Los resultados se ajustan tanto cuantitativa como cualitativamente a los observados. Además, el modelo es capaz de imitar algunos comportamientos que hasta la fecha habían sido pasados por alto.
- *Transparencia:* Los mecanismos que dan lugar al comportamiento del modelo son fácilmente comprensibles. El modelo se ha desarrollado sobre ACT-R, cuyos mecanismos y estructuras son muy transparentes y tienen una interpretación directa a nivel biológico.
- *Plausibilidad psicológica:* Los mecanismos y procesos propuestos son consistentes con lo que se sabe en relación al fenómeno de la adquisición de la morfología

verbal y a otros fenómenos cognitivos relacionados. En particular, el modelo es una implementación del modelo Declarativo / Procedural, que cuenta con gran cantidad de evidencias neuropsicológicas que demuestran su plausibilidad. Además, el modelo ha sido desarrollado sobre ACT-R, una arquitectura ampliamente validada en multitud de tareas diferentes y que también se sustenta sobre un gran número de evidencias neuropsicológicas. La mayor crítica realizada en este sentido sobre ACT-R, su gran cantidad de parámetros libres, ha sido eludida en nuestro modelo restringiendo los valores de esos parámetros libres a valores similares a los utilizados en muchas otras tareas cognitivas garantizando, por tanto, su plausibilidad psicológica.

- *Generalidad*: El modelo planteado es capaz de explicar los procesos de adquisición en Inglés y Castellano.
- *Flexibilidad*: El modelo planteado es lo suficientemente flexible como para adecuar sus parámetros a los distintos comportamientos observados, tanto normales como deficitarios, y a las distintas teorías que tratan de explicar un determinado trastorno.

2. **Se ha presentado una metodología de caracterización y ayuda al diagnóstico de trastornos cognitivos no invasiva y de bajo coste.** La metodología cumple, como se planteó, los siguientes requisitos:

- *Generalidad*: La metodología de caracterización y ayuda al diagnóstico no ha sido diseñada para una tarea específica o para un trastorno cognitivo en concreto. Durante la evaluación de la metodología se ha podido comprobar que ésta es válida para distintas tareas (adquisición de la morfología verbal y procesamiento de la misma en la edad adulta) y distintos trastornos (Trastorno específico del Lenguaje y Enfermedad de Alzheimer).
- *Personalización*: La metodología es capaz de caracterizar y ayudar al diagnóstico de cada uno de los trastornos particularizando en las peculiaridades de cada individuo. La metodología propuesta es capaz de dar un diagnóstico individualizado que va más allá de la clasificación clásica de *afectado / no afectado*. Para cada paciente se da una idea de los mecanismos y estructuras subyacentes que están afectados y en qué grado está afectado cada uno de ellos.

3. **Se ha aplicado dicha metodología a la caracterización y la ayuda al diagnóstico de trastornos cognitivos.** Se ha avalado la validez tanto del modelo como de la metodología.

- Se ha aplicado la metodología presentada a un trastorno “puramente” del lenguaje: el Trastorno Específico del Lenguaje.
- Con el objetivo de demostrar la generalidad de la metodología, se ha aplicado a un trastorno no relacionado directamente con el lenguaje: la Enfermedad de Alzheimer.
 - Se ha diseñado y realizado un experimento sobre el procesamiento de la morfología verbal en pacientes con posible Alzheimer que no existía en castellano.
 - Se ha adaptado con éxito el modelo a la edad adulta.

La consecución de estos objetivos en el diseño y el desarrollo del modelo y la metodología ha conllevado la demostración de las distintas subhipótesis planteadas en la etapa de aplicación y, por consiguiente la demostración de la hipótesis de partida. En particular se ha demostrado tanto en el caso del TEL como en el caso de la EA las siguientes subhipótesis:

- Las variables obtenidas a partir del modelado computacional cognitivo poseen una capacidad informativa y discriminatoria mayor que la de las variables conductuales.
- El uso de técnicas avanzadas de clasificación a partir de la información obtenida a través del modelado computacional cognitivo permite obtener mejores resultados en términos de ayuda al diagnóstico.
- El uso de técnicas de agrupamiento a partir de la información obtenida a través del modelado computacional cognitivo permite obtener mejores resultados en términos de caracterización y puede ser útil para apoyar o refutar distintas teorías sobre las causas del trastorno estudiado.

8.3. Aportaciones

Como se pretendía, este trabajo de tesis ha realizado varias aportaciones tanto en el área del modelado computacional cognitivo como en la ayuda a la caracterización y el diagnóstico de trastornos cognitivos.

8.3.1. Modelado

- En primer lugar, se ha realizado un amplio estudio del estado del arte de las teorías sobre el proceso de adquisición de la morfología verbal y los modelos computacionales que las han implementado hasta la fecha.

- Se ha presentado un resumen de la arquitectura cognitiva ACT-R que no existía en la literatura en castellano.
- Se ha diseñado y desarrollado un modelo computacional cognitivo de los procesos de adquisición y desarrollo de la morfología verbal, basado en el modelo Declarativo / Procedural. El modelo realiza una serie de aportaciones respecto a los modelos existentes:
 - Es el primer modelo de adquisición de la morfología verbal castellana ampliamente validado.
 - Es el primer modelo simbólico de adquisición de la morfología verbal desde un punto de vista translingüístico.
 - Es el primer modelo simbólico que combina información fonológica, morfológica y semántica dando como resultado un mejor ajuste a los datos.
- Se ha implementado un mecanismo de ruido en la percepción y la interpretación de características fonológicas y morfológicas que permite simular, hasta cierto, punto, los procesos de adquisición de dichas características.
- Se ha demostrado la validez del modelo en inglés mediante una validación experimental basada en la comparación del comportamiento del modelo con el comportamiento observado en los niños en distintas tareas lingüísticas. En todas esas tareas, el ajuste mostrado ha sido tanto cualitativo como cuantitativo.
- Se ha demostrado la validez del modelo en inglés mediante una validación experimental basada en la comparación del comportamiento del modelo con el comportamiento observado en los niños en distintas tareas lingüísticas. En todas esas tareas, el ajuste mostrado ha sido tanto cualitativo como cuantitativo.
- Finalmente, todas estas aportaciones suponen una evidencia más de la validez del modelo Declarativo / Procedural. Evidencia, desde el punto de vista del modelado computacional cognitivo, que no existía hasta la fecha.

8.3.2. Caracterización y diagnóstico

- Se ha realizado un amplio estudio del estado del arte de las técnicas de caracterización y diagnóstico del TEL y de la relación entre la EA y el lenguaje y los métodos de diagnóstico basados en esa relación.
- Se ha diseñado una metodología de caracterización y ayuda al diagnóstico de trastornos cognitivos no invasiva y de bajo coste. La metodología ha sido diseñada para

superar las tres limitaciones fundamentales detectadas en los métodos actuales de caracterización y ayuda al diagnóstico.

- Se ha aplicado la metodología al caso particular del Trastorno Específico del Lenguaje demostrando que la metodología propuesta supera a los métodos actuales tanto en términos de caracterización como en términos de ayuda al diagnóstico. En particular, los resultados obtenidos muestran que la metodología propuesta supera los umbrales reconocidos comúnmente para considerar un método de ayuda al diagnóstico como aceptable.
- Se ha aportado una evidencia más en favor de la teoría del déficit procedural del TEL. De hecho, se ha demostrado la validez de la metodología propuesta como método para avalar o refutar hipótesis o teorías acerca de los trastornos estudiados.
- Se ha aplicado la metodología al Alzheimer demostrando que la metodología propuesta supera a los métodos actuales en términos de ayuda al diagnóstico. Como en el caso anterior, los resultados obtenidos muestran que la metodología propuesta supera los umbrales reconocidos comúnmente para considerar un método de ayuda al diagnóstico como aceptable. De este modo, no sólo queda demostrada la validez de la metodología sino que también se demuestra su generalidad.
- Se ha diseñado y realizado un experimento, que hasta la fecha no existía en castellano, para obtener datos empíricos sobre el procesamiento de la morfología verbal en pacientes con posible Alzheimer.
- Finalmente, se ha demostrado que la información relativa a los procesos que subyacen a un determinado trastorno tiene una mayor capacidad informativa y discriminatoria que la información obtenida a través de la mera observación del comportamiento. Del mismo modo se ha demostrado que el modelado computacional cognitivo es una herramienta adecuada para conseguir dicha información y que las técnicas de aprendizaje automático son más adecuadas que las técnicas clásicas de análisis de dicha información.

8.4. Trabajo futuro

El presente trabajo de tesis deja abiertas varias líneas de trabajo:

En cuanto a la etapa de modelado, se propone en primer lugar ampliar la generalidad del modelo tratando de dar explicación a un mayor número de fenómenos empíricos. Del

mismo modo, se pretende utilizar el modelo para realizar predicciones sobre comportamientos que aún no hayan sido estudiados empíricamente para así demostrar aún más la validez del modelo. Estas predicciones serán realizadas tanto acerca del comportamiento normal como acerca de comportamientos en distintos déficits cognitivos.

Además, se propone la mejora del modelo mediante la optimización de sus parámetros y la eliminación, o al menos la reducción, de algunas de sus suposiciones y simplificaciones iniciales. Como hemos visto, los valores de todos los parámetros tienen una justificación teórica clara. Sin embargo, en algunos casos, no se ha buscado el valor óptimo, como por ejemplo para la constante en la componente ruidosa de los mecanismos de percepción e interpretación o en el parámetro utilizado para acotar los valores del modelo. Se propone como trabajo futuro la optimización de todos los parámetros del modelo. En cuanto a las suposiciones y simplificaciones, su eliminación es muy complicada porque en muchos casos vienen motivadas por la propia complejidad del problema y el desconocimiento existente acerca de los procesos cognitivos involucrados. Por ejemplo, el modelo propuesto supone que los mecanismos de reconocimiento de las características fonológicas y morfológicas están plenamente desarrollados en el momento en el que el niño empieza a hablar. La única limitación que se pone a esa suposición es la introducción de un factor de ruido en la percepción y la interpretación. Sin duda, modelar exactamente cómo se desarrollan en paralelo esos mecanismos junto con los procesos de adquisición de la morfología verbal resulta extremadamente complicado por lo complejo del problema. Sin embargo, sería conveniente incluir una mejor representación del desarrollo de estos mecanismos para aumentar la plausibilidad psicológica del modelo.

En cuanto a la segunda parte de este trabajo de tesis, también se proponen algunas mejoras y vías de trabajo futuro:

En primer lugar se propone la optimización de las distintas etapas de la metodología. Esta optimización incluiría un estudio comparativo de la eficacia y eficiencia de distintas técnicas de optimización para la etapa de individualización y un estudio similar al realizado en la cuarta etapa, incluyendo otras técnicas distintas y optimizando sus parámetros para encontrar el comportamiento óptimo de la metodología. De hecho, sería interesante hacer un análisis de las técnicas más adecuadas para cada problema en concreto, puesto que distintas técnicas pueden mostrar un comportamiento muy diferente al aplicarse a problemas distintos. Por tanto, una exploración más exhaustiva de los distintos tipos de técnicas de aprendizaje automático se plantea como trabajo futuro.

Se pretenden ampliar las bases de datos de pacientes disponibles. Uno de los principales problemas al trabajar con determinados trastornos cognitivos consiste en la escasez de pacientes disponibles para los estudios. En particular, se pretende ampliar el estudio realizado sobre morfología verbal en pacientes con posible Alzheimer por su valor como estudio empírico en sí y para aumentar la calidad de los resultados obtenidos por las técnicas de aprendizaje automático tanto en términos de caracterización como en términos de ayuda al diagnóstico.

Por último se propone la colaboración con expertos en diagnóstico y en diseño de terapias para comprobar la eficacia de nuevas terapias diseñadas a partir de los resultados obtenidos por nuestra metodología. En este sentido, se puede plantear también la metodología propuesta como una métrica para la evaluación de terapias ya que permitiría comprobar si ha habido cierta evolución no sólo en el comportamiento observado sino también en las estructuras que provocan ese comportamiento.

Bibliografía

- [**Aguado-Orea, 2004**] Aguado-Orea, J. (2004). *The acquisition of morpho-syntax in Spanish: Implications for current theories of development*. Unpublished, University of Nottingham.
- [**Aguilar-Mediavilla et al., 2002**] Aguilar-Mediavilla, E., Sanz-Torrent, M., y Serra-Raventos, M. (2002). A comparative study of phonology of pre-school children with specific language impairment (sli), language delay (ld) and normal acquisition. *Clinical Linguistics and Phonetics*, 16:573–596.
- [**Albright y Hayes, 2003**] Albright, A. y Hayes, B. (2003). Rules vs. analogy in english past tenses: a computational/experimental study. *Cognition*, 90:119–161.
- [**Alcoba, 1999**] Alcoba, S. (1999). *Gramática descriptiva de la Lengua Española.*, páginas 4915 – 4991. Espasa-Calpe, Madrid.
- [**Ambridge y Lieven, 2011**] Ambridge, B. y Lieven, E. (2011). *Child Language Acquisition*. Cambridge University Press, New York.
- [**Anderson, 1983**] Anderson, J. (1983). A spreading activation theory of memory. *Journal of verbal learning and verbal behaviour*, 22:261–295.
- [**Anderson, 2007**] Anderson, J. (2007). *How can the human mind occur in the physical universe?* Oxford University Press, New York.
- [**Appell et al., 1982**] Appell, J., Kertesz, A., y Fisman, M. (1982). A study of language functioning in alzheimer patients. *Brain and Language*, 17(1):73 – 91.
- [**Araujo y Cervigón, 2009**] Araujo, L. y Cervigón, C. (2009). *Algoritmos evolutivos: Un enfoque práctico*. Erlbaum, Hillsdale, NJ.
- [**Bates, 1991**] Bates, E. (1991). Cross-linguistic studies of aphasia [special issue]. *Brain and Language*, 41.

- [**Bedore y Leonard, 1997**] Bedore, L. y Leonard, L. (1997). Specific language impairment and grammatical morphology: A discriminant functional analysis. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, 41:1185–1192.
- [**Bedore y Leonard, 2001**] Bedore, L. y Leonard, L. (2001). Grammatical morphology deficits in spanish-speaking children with specific language impairment. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, 44:905–924.
- [**Bedore y Leonard, 2005**] Bedore, L. y Leonard, L. (2005). Verb inflections and noun phrase morphology in the spontaneous speech of spanish-speaking children with specific language impairment. *Applied Psycholinguistics*, 26:195–225.
- [**Berko, 1958**] Berko, J. (1958). The child's learning of english morphology. *Word*, 14:150 – 177.
- [**Beyer y Schwefel, 2002**] Beyer, H. y Schwefel, H. (2002). Evolution strategies: A comprehensive introduction. *Natural Computing*, 1(1):3 – 52.
- [**Bird et al., 1995**] Bird, J., Bishop, D., y Freeman, N. (1995). Phonological awareness and literacy development in children with expressive phonological impairments. *Journal of Speech and Hearing Research*, 38:446–462.
- [**Bishop, 2000**] Bishop, D. (2000). *Pragmatic language impairment: A correlate of SLI, a distinct subgroup or part of the autistic continuum?*, páginas 99–113. Psychology Press, Hove, UK.
- [**Bishop, 2002**] Bishop, D. (2002). Motor immaturity and specific speech and language impairment: evidence for a common genetic basis. *American Journal of Medical Genetics*, 114(1):56–63.
- [**Bishop et al., 2006**] Bishop, D., Adams, C., y Rosen, S. (2006). Resistance of grammatical impairment to computerized comprehension training in children with specific and non-specific language impairments. *International Journal of Language and Communication Disorders*, 41:19–40.
- [**Boden, 1988**] Boden, M. (1988). *Computer models of mind*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [**Bohannon y Stanowicz, 1988**] Bohannon, J. y Stanowicz, L. (1988). The issue of negative evidence: Adult responses to children's language errors. *Developmental Psychology*, 24:684–689.

- [**Bortoloini y Leonard, 2000**] Bortoloini, U. y Leonard, L. (2000). Phonology and children with specific language impairment: status of structural constraints in two languages. *Journal of Communication Disorders*, 33:131–150.
- [**Botting y Conti-Ramsden, 2001**] Botting, N. y Conti-Ramsden, G. (2001). Non-word repetition and language development in children with specific language impairment. *International Journal of Language and Communication Disorders*, 36:421–432.
- [**Brackenbury y Pye, 2005**] Brackenbury, T. y Pye, C. (2005). Semantic deficits in children with language impairments: Issues for clinical assessment. *Language, Speech and Hearing Services in Schools*, 36(1):5–16.
- [**Brown y Hanlon, 1970**] Brown, R. y Hanlon, C. (1970). *Derivational complexity and order of acquisition in child speech*. Wiley, New York.
- [**Bucks et al., 2000**] Bucks, R., Singh, S., Cuerden, J., y Wilcock, G. (2000). Analysis of spontaneous, conversational speech in dementia of alzheimer type: Evaluation of an objective technique for analyzing lexical performance. *Aphasiology*, 14(1):71–91.
- [**Campbell et al., 1997**] Campbell, T., Dollaghan, C., Needleman, H., y Janosky, J. (1997). Reducing bias in language assessment: processing-dependent measures. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, 40:519–525.
- [**Cara y Goswami, 2002**] Cara, B. D. y Goswami, U. (2002). Similarity relations among spoken words: The special status of rimes in english. *Behavior Research Methods, Instruments & Computers*, 34:416 – 423.
- [**Caramelli et al., 1998**] Caramelli, P., Mansur, L., y Nitrini, R. (1998). *Language and communication disorders in dementia of the Alzheimer type.*, páginas 463–473. Academic Press, NewYork.
- [**Cherktow y Bub, 1990**] Cherktow, H. y Bub, D. (1990). Semantic memory loss in dementia of the alzheimer’s type. *Brain*, 113:397–417.
- [**Chomsky, 1965**] Chomsky, N. (1965). *Aspects of the Theory of Syntax*. MIT Press, Cambridge, MA.
- [**Chomsky, 1975**] Chomsky, N. (1975). *Reflections on Language*. Fontana, London.
- [**Chomsky, 1993**] Chomsky, N. (1993). *A minimalist program for linguistic theory*. MIT working papers in linguistics, Cambridge, MA.

- [**Chomsky y Lasnik, 1993**] Chomsky, N. y Lasnik, H. (1993). *Principles and Parameters Theory*. de Gruyter, Berlin.
- [**Clahsen, 1999**] Clahsen, h. (1999). Lexical entries and rules of language: a multidisciplinary study of german inflection. *Behavioral and Brain Sciences*, 22:991–1060.
- [**Clahsen et al., 2002**] Clahsen, H., Aveledo, F., y Roca, I. (2002). The development of regular and irregular verb inflection in spanish child language. *Journal of Child Language*, 29:591 – 622.
- [**Conti-Ramsden y Botting, 1999**] Conti-Ramsden, G. y Botting (1999). Characteristics of children attending language units in england: a national study of 7-year-olds. *International Journal of Language and Communication Disorders.*, 34:359–366.
- [**Cortes y Vapnik, 1995**] Cortes, C. y Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. *Machine Learning*, 20:273–297.
- [**Cortese et al., 2006**] Cortese, M., Balota, D., Sergent, S., Buckner, R., y Gold, B. (2006). Consistency and regularity in past-tense verb generation in healthy ageing, alzheimer’s disease and semantic dementia. *Cognitive Neuropsychology*, 23(6):856–876.
- [**Craig, 1993**] Craig, H. (1993). Social skills of children with specific language impairment: Peer relations. *Language, Speech and Hearing Services in Schools*, 24:206–215.
- [**Croot et al., 2000**] Croot, K., Hodges, J., Xuereb, J., y Patterson, K. (2000). Phonological and articulatory impairment in alzheimer’s disease: A case series. *Brain and Language*, 75:277–309.
- [**Cuetos et al., 2003**] Cuetos, F., Martinez, T., Martinez, C., Izura, C., y Ellis, A. (2003). Lexical processing in spanish patients with probable alzheimer’s disease. *Cognitive Brain Research*, 17:549–561.
- [**Damasio et al., 1996**] Damasio, H., Grabowski, T., Tranel, D., Hichwa, R., y Damasio, A. (1996). A neural basis for lexical retrieval. *Nature*, 380(6574):499–505.
- [**Demetras et al., 1986**] Demetras, M., Post, K., y Snow, C. (1986). Feedback to first language learners: The role of repetitions and clarification questions. *Journal of child Language*, 13:275–292.
- [**Dewey y Wall, 1997**] Dewey, D. y Wall, K. (1997). Praxis and memory deficits in language impaired children. *Developmental Neuropsychology*, 13(4):507–512.

- [**Dick et al., 2004**] Dick, F., Wulfeck, B., Krupa-Kwiatkowski, M., y Bates, E. (2004). The development of complex sentence interpretation in typically developing children compared with children with specific language impairments or early unilateral focal lesions. *Developmental Science*, 7(3):360–377.
- [**D'introno et al., 1995**] D'introno, F., del Teso Martín, E., y Weston, R. (1995). *Fonética y fonología actual del español*. Ediciones Cátedra.
- [**Dockrell et al., 2003**] Dockrell, J., Messer, D., George, R., y Ralli, M. (2003). Beyond naming patterns in children with wdfs – definitions for nouns and verbs. *Journal of Neurolinguistics*, 16:191–211.
- [**Dronkers et al., 1998**] Dronkers, N., Redfern, B., y Knight, R. (1998). *The neural architecture of language disorders*, páginas 949–958. MIT Press, Cambridge, MA.
- [**Dubois, 2007**] Dubois, B. (2007). Research criteria for the diagnosis of alzheimer's disease: revising the nincds-adrda criteria. *The Lancet Neurology*, 6(8):734–746.
- [**Dunn et al., 1996**] Dunn, M., Flax, J., Sliwinski, M., y Aram, D. (1996). The use of spontaneous language measures as criteria for identifying children with specific language impairment. *Journal of Speech and Hearing Research*, 39:643–654.
- [**Eddington, 2009**] Eddington, D. (2009). Spanish verbal inflection: A single- or dual-route system? *Linguistics*, 47:173–199.
- [**Eiben y Smith, 2002**] Eiben, A. y Smith, J. (2002). *Introduction to evolutionary computation*. Springer.
- [**Eichenbaum y Cohen, 2001**] Eichenbaum, H. y Cohen, N. J. (2001). *From conditioning to conscious recollection: memory systems of the brain*. Oxford University Press, New York.
- [**Ellis y Schmidt, 1998**] Ellis, N. y Schmidt, R. (1998). Rules or associations in the acquisition of morphology? the frequency by regularity interaction in human and pdp learning of morphosyntax. *Language and Cognitive Processes*, 13:307 – 336.
- [**Feyereisen et al., 2007**] Feyereisen, P., Berrewaerts, J., y Hupet, M. (2007). Pragmatic skills in the early stages of alzheimer's disease: an analysis by means of a referential communication task. *International Journal of Language and Communication Disorders*, 42(1):1 – 17.

- [**Folstein et al., 1975**] Folstein, M., Folstein, S., y McHugh, P. (1975). Mini-mental state. a practical method for grading the cognitive state of patients for the clinician. *Journal of Psychiatric Research*, 12(3):189–198.
- [**Francis y Kucera, 1982**] Francis, W. y Kucera, H. (1982). *Frequency analysis of English usage: lexicon and grammar*. Houghton Mifflin, Boston, MA.
- [**Friederici, 2002**] Friederici, A. (2002). Towards a neural basis of auditory sentence processing. *Trends in Cognitive Science*, 6(2):78–84.
- [**Fromkin et al., 2002**] Fromkin, V., Blair, D., y Collins, P. (2002). *An introduction to language*. Thomson Heinle, Boston, MA, 7th edition.
- [**Fromkin et al., 2000**] Fromkin, V., Krashen, S., Curtis, S., Rigler, D., y Rigler, M. (2000). The development of language in genie: a case of language acquisition beyond the “critical period”. *Brain and language*, 1:81–107.
- [**Fromkin et al., 2010**] Fromkin, V., Rodman, R., y Hyams, N. (2010). *An introduction to language*. Michael Rosenberg, Boston, MA, 9th edition.
- [**Gabani et al., 2009**] Gabani, K., Sherman, M., Solorio, T., Liu, Y., Bedore, L., y Peña, E. (2009). A corpus-based approach for the prediction of language impairment in monolingual english and spanish-english bilingual children. En *North American Chapter of the Association for Computational Linguistics*, páginas 46–55, Colorado. Association for Computational Linguistics.
- [**Gabani et al., 2011**] Gabani, K., Solorio, T., Liu, Y., Bedore, L., y Peña, E. (2011). Exploring a corpus-based approach for the prediction of language impairment in monolingual english-speaking children. *Artificial Intelligence in Medicine*, 53:161–170.
- [**Gathercole y Baddeley, 1990**] Gathercole, S. y Baddeley, A. (1990). Phonological memory deficits in language disordered children: Is there a causal connection? *Journal of memory and language*, 29:336–360.
- [**Gathercole y Baddeley, 1993**] Gathercole, S. y Baddeley, A. (1993). *Working memory and language*. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ.
- [**Gathercole et al., 1999**] Gathercole, V., Sebastián, E., y Soto, P. (1999). The early acquisition of Spanish verbal morphology: Across-the-board or piecemeal knowledge? *International Journal of Bilingualism*, 3(2-3):133–182.

- [**Gathercole et al., 2002**] Gathercole, V. C. M., Sebastián, E., y Soto, P. (2002). Input and first language acquisition: Evaluating the role of frequency. *Language Learning*, 52(4):679 – 722.
- [**Gauger et al., 1997**] Gauger, L., Lombardino, L., y Leonard, C. (1997). Brain morphology in children with specific language impairment. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, 40(6):1272–1284.
- [**Georgopoulos et al., 2003**] Georgopoulos, V., Malandraki, G., y Stylios, C. (2003). A fuzzy cognitive map approach to differential diagnosis of specific language impairment. *Artificial Intelligence in Medicine*, 29:261–278.
- [**Gold, 1967**] Gold, E. (1967). Language identification in the limit. *Information and control*, 10:447 – 474.
- [**Gopnik y Crago, 1991**] Gopnik, M. y Crago, M. (1991). Familial aggregation of a developmental language disorder. *Cognition*, 39:1–50.
- [**Gray, 2012**] Gray, K. (2012). *Machine learning for image-based classification of Alzheimer's disease*. PhD thesis, Imperial College London.
- [**Grinstead, 2000**] Grinstead, J. (2000). Case, inflection and subject licensing in child catalan and spanish. *Journal of Child Language*, 27:119 – 155.
- [**Gutiérrez-Clellen et al., 2000**] Gutiérrez-Clellen, V., Restrepo, M., Silva, M., y Del Castillo, T. (2000). Cross-linguistic profiles of latino children exposed to a second language. En *Proceedings for the 2000 Symposium of Research in Child Language Disorders*.
- [**Guyon y Elisseeff, 2002**] Guyon, I. y Elisseeff, A. (2002). An introduction to variable and feature selection. *Journal of Machine Learning Research*, 3:1157–1182.
- [**Hahn y Nakisa, 2000**] Hahn, U. y Nakisa, R. (2000). German inflection: single route of dual route? *Cognitive Psychology*, 41:313–360.
- [**Hansson y Nettelbladt, 1995**] Hansson, K. y Nettelbladt, U. (1995). Grammatical characteristics of swedish children with sli. *Journal of Speech and Hearing Research*, 38:589–598.
- [**Hartshorne y Ullman, 2006**] Hartshorne, J. y Ullman, M. (2006). Why girls say 'hol-ded' more than boys. *Developmental Science*, 1(9):21–32.

- [**Hernández-Pina, 1984**] Hernández-Pina, R. (1984). *Teorías psicolingüísticas y su aplicación a la adquisición del español como lengua materna*. Siglo XXI, Madrid.
- [**Hill, 2001**] Hill, E. (2001). Non-specific nature of specific language impairment: A review of the literature with regard to concomitant motor impairment. *International journal of language and communication disorders*, 36:149–171.
- [**Howlin, 1984**] Howlin, P. (1984). The acquisition of grammatical morphemes in autistic children. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 14(2):127–136.
- [**Hsu y Bishop, 2010**] Hsu, H. y Bishop, D. (2010). Grammatical difficulties in children with specific language impairment: is learning deficient? *Human Development*, 53:264–277.
- [**Iglesias, 2013**] Iglesias, A. (2013). *Modelo computacional cognitivo de toma de decisiones basado en el conocimiento: Aplicación en la inferencia de explicaciones*. PhD thesis, Facultad de Informática. Universidad Complutense de Madrid.
- [**Jarrold et al., 2010**] Jarrold, W. L., Peintner, B., Yeh, E., Krasnow, R., Javitz, H., y Swan, G. (2010). Language analytics for assessing brain health: Cognitive impairment, depression and pre-symptomatic alzheimer’s disease. En *Brain Informatics*, volumen 6334 de *Lecture Notes in Computer Science*, páginas 299–307. Springer Berlin Heidelberg.
- [**Johnson, 1995**] Johnson, C. (1995). Verb errors in the early acquisition of Mexican and Castilian Spanish. En Clark, E., editor, *The Proceedings of the 27th Annual Child Language Research Forum.*, Cambridge. Cambridge University Press.
- [**Jong, 2006**] Jong, K. D. (2006). *Evolutionary computation: a unified approach*. MIT Press, Cambridge MA.
- [**Kaan y Swaab, 2002**] Kaan, E. y Swaab, T. (2002). The brain circuitry of syntactic comprehension. *Trends in Cognitive Science*, 6(8):350–356.
- [**Karaminis y Thomas, 2010**] Karaminis, T. y Thomas, M. (2010). A cross-linguistic model of the acquisition of inflectional morphology in english and modern greek. En Ohlsson, S. y Catrambone, R., editores, *Proceedings of 32nd Annual Conference of the Cognitive Science Society*, Portland, Oregon, USA.
- [**Labelle, 2005**] Labelle, M. (2005). *The acquisition of grammatical categories: a state of the art*, páginas 433–457. Elsevier.

- [**Lang, 1997**] Lang, T. (1997). *Now to report statistics in medicine: annotated guidelines for authors, editors, and reviewers*. American college of Physicians, Philadelphia.
- [**Law et al., 2004**] Law, J., Garret, Z., y Nye, C. (2004). The efficacy of treatment for children with developmental speech. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, 47:924–943.
- [**Lehmann et al., 2007**] Lehmann, C., Koenig, T., Jelic, V., Prichep, L., y John, R. (2007). Application and comparison of classification algorithms for recognition of alzheimer’s disease in electrical brain activity (eeg). *Journal of neuroscience methods*, 161.
- [**Leonard, 1998**] Leonard, L. (1998). *Children with specific language impairment*. MIT Press, Cambridge MA.
- [**Leonard et al., 1997**] Leonard, L., Eyer, J. A., Bedore, L., y Grela, B. (1997). Three accounts of the grammatical morpheme difficulties of english-speaking children with specific language impairment. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, 40(4):741–753.
- [**Leonard et al., 1992**] Leonard, L., McGregor, K., y Allen, G. (1992). Grammatical morphology and speech perception in children with specific language impairment. *Journal of Speech and Hearing Research*, 35:1076–1085.
- [**Lewandowsky, 1993**] Lewandowsky, S. (1993). The rewards and hazards of computer simulations. *Psychological Sciences*, 4:236 – 243.
- [**Ling, 1994**] Ling, C. (1994). Learning the past tense of english verbs: the symbolic pattern associator vs. connectionist models. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 1:209–229.
- [**Ling y Marinov, 1993**] Ling, C. y Marinov, M. (1993). Answering the connectionist challenge: a symbolic model of learning the past tenses of english verbs. *Cognition*, 49:235 – 290.
- [**López-Ornat, 1994**] López-Ornat, S. (1994). *La metodología de la investigación longitudinal*. Siglo XXI, Madrid.
- [**MacWhinney, 1978**] MacWhinney, B. (1978). The acquisition of morphophonology. *Monographs of the Society for Research in Child Development.*, 1(43):1–123.
- [**MacWhinney, 2000**] MacWhinney, B. (2000). *The CHILDES project*. Erlbaum, Hillsdale, NJ.

- [**MacWhinney y Leinbach, 1991**] MacWhinney, B. y Leinbach, J. (1991). Implementations are not conceptualizations: revising the verb learning model. *Cognition*, 40:121 – 157.
- [**Maillart y Parisse, 2006**] Maillart, C. y Parisse, C. (2006). Phonological deficits in french speaking children with sli. *Journal of Language and Communication Disorders*, 41(3):253–274.
- [**Maratsos, 2000**] Maratsos, M. (2000). More overregularizations after all: new data and discussion on Marcus, Pinker, Ullman, Hollander, Rosen and Xu. *Journal of Child Language*, 27:183 – 212.
- [**Marcus, 1993**] Marcus, G. (1993). Negative evidence in language acquisition. *Cognition*, 46:53 – 85.
- [**Marcus et al., 1995**] Marcus, G., Brinkman, U., Clahsen, H., Wiese, R., y Pinker, S. (1995). German inflection: the exception that proves the rule. *Cognitive Psychology*, 29:189 – 256.
- [**Marcus et al., 1992**] Marcus, G., Pinker, S., Ullman, M., Hollander, M., Rosen, T., y Xu, F. (1992). Overregularization in language acquisition. *Monographs of the Society for Research in Child Development.*, 57(228):1 – 182.
- [**Marslen-Wilson y Tyler, 1998**] Marslen-Wilson, W. y Tyler, L. K. (1998). Rules, representations, and the english past tense. *Trends in Cognitive Science*, 2:428 – 435.
- [**McClelland y Patterson, 2002**] McClelland, J. y Patterson, K. (2002). 'words or rules' cannot exploit the regularity in exceptions. *Trends in Cognitive Science*, 11(6):464–465.
- [**Michie et al., 1994**] Michie, D., Spiegelhalter, D., y Taylor, C. (1994). *Machine learning, neural and statistical classification*. Ellis Horwood.
- [**Mierswa et al., 2006**] Mierswa, I., Wurst, M., Klinkenberg, R., Scholz, M., y Euler, T. (2006). Yale: Rapid prototyping for complex data mining tasks. En Ungar, L., Craven, M., Gunopulos, D., y Eliassi-Rad, T., editores, *KDD '06: Proceedings of the 12th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining*, páginas 935–940, New York, NY, USA. ACM.
- [**Mitchell, 1997**] Mitchell, T. (1997). *Machine Learning*. McGraw-Hill.

- [**Montgomery, 2003**] Montgomery, J. (2003). Working memory and comprehension in children with specific language impairment: What we know so far. *Journal of Communication Disorders*, 36:221–231.
- [**Montrul, 2004**] Montrul, S. (2004). *The acquisition of Spanish: Morphosyntactic development in monolingual and bilingual L1 acquisition and adult L2 acquisition*. Benjamins, Amsterdam.
- [**Nakisa y Hahn, 1996**] Nakisa, R. y Hahn, U. (1996). Where defaults don't help: The case of the german plural system. En *Proceedings of the 18th Conference of the Cognitive Science Society*, Mahwah, NJ. Lawrence Erlbaum.
- [**Oliva et al., 2013**] Oliva, J., Serrano, J., del Castillo, M., y Iglesias, A. (2013). Computational cognitive modeling for the diagnosis of specific language impairment. En *Proceedings of the EFMI-STC Data and Knowledge for Medical Support Systems Conference*, Praga.
- [**Oliva et al., 2010**] Oliva, J., Serrano, J. I., Del Castillo, M. D., y Iglesias, A. (2010). Cognitive modeling of the acquisition of a highly inflected verbal system. En Salvucci, D. y Gunzelmann, G., editores, *Proceedings of the 10th International Conference on Cognitive Modeling*, páginas 181–186, Philadelphia, PA. Drexel University.
- [**Pasquier, 1999**] Pasquier, F. (1999). Early diagnosis of dementia: neuropsychology. *Journal of Neurology*, 246:6–15.
- [**Payne et al., 1994**] Payne, A., Whitehurst, G., y Angell, A. (1994). The role of home literacy environment in the development of language ability in preschool children from low-income families. *Early Childhood Research Quarterly*, 9:427–440.
- [**Peña et al., 2001**] Peña, E., Iglesias, A., y Lidz, C. (2001). Reducing test bias through dynamic assessment of children's word learning ability. *American Journal of Speech-Language Pathology*, 10:138–154.
- [**Pérez-Pereira, 1989**] Pérez-Pereira, M. (1989). The acquisition of morphemes: Some evidence from spanish. *Journal of Psycholinguistic Research*, 18(3):289–312.
- [**Pinker, 1984**] Pinker, S. (1984). *Language learnability and language development*. Harvard University Press, Cambridge, MA.
- [**Pinker, 1994**] Pinker, S. (1994). *El instinto del lenguaje*. Alianza Editorial.
- [**Pinker, 1999**] Pinker, S. (1999). *Words and rules: the ingredients of language*. Harper Collins, New York, NY.

- [**Pinker y Prince, 1988**] Pinker, S. y Prince, A. (1988). On language and connectionism: analysis of a distributed processing model of language acquisition. *Cognition*, 28:73 – 193.
- [**Pinker y Ullman, 2002**] Pinker, S. y Ullman, M. (2002). The past and future of the past tense. *Trends in Cognitive Science*, 11(6):456–463.
- [**Plante y Vance, 1994**] Plante, E. y Vance, R. (1994). Selection of preschool language tests: A data-base approach. *Language, Speech and Hearing Services in School*, 25:15–24.
- [**Plunkett y Juola, 1999**] Plunkett, K. y Juola, P. (1999). A connectionist model of English past tense and plural morphology. *Cognitive Science*, 23:463 – 490.
- [**Plunkett y Marchman, 1990**] Plunkett, K. y Marchman, M. (1990). From rote learning to system building (tech. rep. no. 9020). Technical report, University of California, Center for Research in Language.
- [**Plunkett y Marchman, 1991**] Plunkett, K. y Marchman, V. (1991). U-shaped learning and frequency effects in a multi-layered perceptron: implications for child language acquisition. *Cognition*, 38:43 – 102.
- [**Plunkett y Marchman, 1993**] Plunkett, K. y Marchman, V. (1993). From rote learning to system building: acquiring verb morphology in children and connectionist nets. *Cognition*, 48:21 – 69.
- [**Plunkett y Nakisa, 1997**] Plunkett, K. y Nakisa, R. (1997). A connectionist model of the arabic plural system. *Language and Cognitive Processes*, 12:807–836.
- [**Prasada y Pinker, 1993**] Prasada, S. y Pinker, S. (1993). Generalizations of regular and irregular morphology. *Language and Cognitive Processes*, 8:1 – 56.
- [**Prevost, 2009**] Prevost, P. (2009). *The Acquisition of French*. The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc.
- [**Prud’hommeaux y Rouhizadeh, 2012**] Prud’hommeaux, E. y Rouhizadeh, M. (2012). Automatic detection of pragmatic deficits in children with autism. En *Proceedings of the 3rd Workshop on Child, Computer and Interaction (WOCCI 2012)*.
- [**Pullum, 1996**] Pullum, G. (1996). Learnability, hyperlearning and the poverty of the stimulus. En Johnson, J., Juge, M., y Moxley, J., editores, *Proceedings of the 22nd Annual Meeting of the Berkeley Linguistics Society*, páginas 498–513, Berkeley, CA.

- [**Pullum y Scholz, 2002**] Pullum, G. y Scholz, B. (2002). Empirical assessment of stimulus poverty arguments. *The Linguistic Review*, 19:9–50.
- [**Quinlan, 1993**] Quinlan, J. (1993). *C4.5: Programs for Machine Learning*. Morgan Kaufmann.
- [**Radford y Ploennig-Pacheco, 1995**] Radford, A. y Ploennig-Pacheco, I. (1995). The morphosyntax of subjects and verbs in child spanish: a case study. *Essex Research Reports in Linguistics*, 5:23 – 67.
- [**RAE, 2012**] RAE (2012). Real Academia Española: Banco de datos (CREA) [en línea]. Corpus de Referencia del Español Actual. <http://www.rae.es>.
- [**Ragnarsdottir et al., 1999**] Ragnarsdottir, H., Simonsen, H., y Plunkett, K. (1999). The acquisition of past tense morphology in icelandic and norwegian children: An experimental study. *Journal of Child Language*, 26:577 – 618.
- [**Restrepo, 1998**] Restrepo, M. (1998). Identifiers of predominantly spanish-speaking children with language impairment. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, 41:1398–1411.
- [**Restrepo y Gutiérrez-Clellen, 2004**] Restrepo, M. y Gutiérrez-Clellen, V. (2004). *Grammatical impairments in Spanish-English bilingual children*, páginas 213–234. Brookes, Baltimore, MD.
- [**Rice et al., 1995**] Rice, M., Wexler, K., y Cleave, P. (1995). Specific language impairment as a period of extended optional infinitive. *Journal of Speech and Hearing Research*, 38:850–863.
- [**Rivera et al., 2009**] Rivera, S., Bates, E., Orozco-Figueroa, A., y Wicha, N. (2009). Spoken verb processing in spanish: An analysis using a new online database. *Applied Psycholinguistics*, página Accepted.
- [**Roark et al., 2007**] Roark, B., Hosom, J., Mitchell, M., y Kaye, J. (2007). Automatically derived spoken language markers for detecting mild cognitive impairment. En *Proceedings of the 2nd international conference on technology and aging (ICTA)*.
- [**Ruh y Westermann, 2008**] Ruh, N. y Westermann, G. (2008). A single-mechanism dual-route model of German verb inflection. En *Proceedings of the 30th Annual Conference of the Cognitive Science Society*, páginas 2209–2216, Austin, TX. Cognitive Science Society.

- [**Ruh y Westermann, 2009**] Ruh, N. y Westermann, G. (2009). *Simulating German verb inflection with a constructivist neural network*, páginas 313–324. World Scientific, London.
- [**Rumelhart y McClelland, 1986**] Rumelhart, D. y McClelland, J. (1986). *On learning the past tense of English verbs*, páginas 216 – 271. MIT Press, Cambridge, MA.
- [**Sanz-Torrent et al., 2008**] Sanz-Torrent, M., Serrat, E., Andreu, L., y Serra, M. (2008). Verb morphology in catalan and spanish in children with specific language impairment: a developmental study. *Clinical Linguistics and Phonology*, 22(6):459–474.
- [**Schwefel, 1995**] Schwefel, H. (1995). *Evolution and Optimum Seeking*. Wiley, New York.
- [**Seidenberg y Joanise, 2003**] Seidenberg, M. y Joanise, M. (2003). Show us the model. *Trends in Cognitive Science*, 7(3):106–107.
- [**Serrat y Aparici, 1999**] Serrat, E. y Aparici, M. (1999). Morphological errors in early language acquisition: evidence from catalan and spanish. Unpublished Ms., Universities of Girona and Barcelona.
- [**Simon-Cereijido y Gutiérrez-Clellen, 2007**] Simon-Cereijido, G. y Gutiérrez-Clellen, V. (2007). Spontaneous language markers of spanish language impairment. *Applied Psycholinguistics*, 28:317–339.
- [**Snowdon et al., 1996**] Snowdon, D., Kemper, S., y Mortimer, J. (1996). Linguistic ability in early life and cognitive function and alzheimer’s disease in late life: Finds from the nun study. *Journal of the American Medical Association*, 3:528–532.
- [**Solorio y Liu, 2008**] Solorio, T. y Liu, Y. (2008). Using language models to identify language impairment in spanish-english bilingual children. En *Proceedings of the workshop on current trends in biomedical natural language processing*, páginas 116–117, Columbus, Ohio.
- [**Spaulding et al., 2006**] Spaulding, T., Plante, E., y Farinella, K. (2006). Eligibility criteria for language impairment: is the low end of normal always appropriate? *Language, Speech and Hearing Services in School*, 37:61–72.
- [**Squire y Zola, 1996**] Squire, L. y Zola, S. (1996). Structure and function of declarative and nondeclarative memory systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 93:13515–13522.

- [**Squire y Knowlton, 2000**] Squire, L. R. y Knowlton, B. J. (2000). *The medial temporal lobe, the hippocampus, and the memory systems of the brain*, páginas 765–779. MIT Press, Cambridge, MA.
- [**Stephany, 1997**] Stephany, U. (1997). *The acquisition of Greek*, volumen 4, páginas 183–333. J. Erlbaum, Hillsdale, NJ.
- [**Stevens et al., 1996**] Stevens, S., Harvey, R., y Kelly, C. (1996). Characteristics of language performance in four groups of patients attending a memory clinic. *International Journal of Geriatric Psychiatry*, 11:973–982.
- [**Stylios et al., 2008**] Stylios, C., Georgopoulos, V., Malandraki, G., y Chouliara, S. (2008). Fuzzy cognitive map architectures for medical decision support systems. *Applied Soft Computing.*, 8:1243–1251.
- [**Taatgen, 2001**] Taatgen, N. (2001). Extending the past-tense debate: a model of the german plural. En *Proceedings of the twenty-third Annual Conference of the Cognitive Science Society*, páginas 1018 – 1023, Mahwah, NJ. Erlbaum.
- [**Taatgen y Anderson, 2002**] Taatgen, N. y Anderson, J. (2002). Why do children learn to say "broke?" a model of learning the past tense without feedback. *Cognition*, 86:123 – 155.
- [**Taatgen y Dijkstra, 2003**] Taatgen, N. y Dijkstra, M. (2003). Constraints on generalization: Why are past tense irregularization errors so rare? En *Proceedings of the 25th Annual conference of the cognitive Science Society*, páginas 1146 – 1151, Mahwah, NJ. Erlbaum.
- [**Tager-Flusberg, 1985**] Tager-Flusberg, H. (1985). The conceptual basis for referential word meaning in children with autism. *Child Development*, 56(5):1167–1178.
- [**Taler y Phillips, 2008**] Taler, V. y Phillips, N. (2008). Language performance in Alzheimer's disease and mild cognitive impairment: a comparative review. *Journal of clinical experimental neuropsychology*, 30(5):501 – 556.
- [**Thomas et al., 2005**] Thomas, C., Keselj, V., Cercone, N., Rockwood, K., y Asp, E. (2005). Automatic detection and rating of dementia of alzheimer type through lexical analysis of spontaneous speech. En *Proceedings of IEEE ICMA*, páginas 1569–1574.
- [**Thomas y Karmiloff-Smith, 2003**] Thomas, M. y Karmiloff-Smith, A. (2003). Modeling language acquisition in atypical phenotypes. *Psychological Review*, 110(4):647–682.

- [**Thomas y Karmiloff-Smith, 2005**] Thomas, M. y Karmiloff-Smith, A. (2005). Can developmental disorders reveal the component parts of the human language faculty? *Language learning and development*, 1(1):65–92.
- [**Thordardottir y Weismer, 2002**] Thordardottir, E. y Weismer, S. (2002). Verb argument structure weakness in specific language impairment in relation to age and utterance length. *Clinical Linguistics and Phonetics*, 16(16):233–250.
- [**Tirosh y Cohen, 1998**] Tirosh, E. y Cohen, A. (1998). Language deficit with an attention-deficit disorder: A prevalent comorbidity. *Journal of Child Neurology*, 13:493–497.
- [**Tombaugh y McIntyre, 1992**] Tombaugh, T. y McIntyre, N. (1992). The mini-mental state examination: a comprehensive review. *Journal of the American Geriatric Society*, 40(9):922–935.
- [**Tomblin et al., 1997**] Tomblin, J., Records, N., Buckwalter, P., Zhang, X., Smith, E., y O'Brien, M. (1997). Prevalence of specific language impairment in kindergarten children. *Journal of Speech and Hearing Research*, 40:1245–1260.
- [**Tor y Ritter, 2004**] Tor, K. y Ritter, F. (2004). Using a genetic algorithm to optimize the fit of cognitive models. En *Proceedings of the 6th international conference on cognitive modeling*, páginas 308–313, Mahwah, NJ. Lawrence Erlbaum.
- [**Ullman, 2001**] Ullman, M. (2001). A neurocognitive perspective on language: the declarative/procedural model. *Nature Reviews*, páginas 717 – 726.
- [**Ullman, 2004**] Ullman, M. (2004). Contributions of memory circuits to language: the declarative/procedural model. *Cognition*, 92:231–270.
- [**Ullman, 2006**] Ullman, M. (2006). Is broca's area part of a basal ganglia thalamocortical circuit? *Cortex*, 42:480 – 485.
- [**Ullman et al., 1997**] Ullman, M., corkin, S., Coppola, M., Hickok, G., Growdon, J., Koroshetz, W., y Pinker, S. (1997). A neural dissociation within language: evidence that the mental dictionary is part of declarative memory, and that grammatical rules are processed by the procedural system. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 9(2):266–276.
- [**Ullman y Gopnik, 1999**] Ullman, M. y Gopnik, M. (1999). Inflectional morphology in a family with inherited specific language impairment. *Applied Psycholinguistics*, 20:51–117.

- [Ullman y Pierpont, 2005] Ullman, M. y Pierpont, E. (2005). Specific language impairment is not specific to language: The procedural deficit hypothesis. *Cortex*, 41(3):399–433.
- [Van der Lely, 1994] Van der Lely, H. (1994). Canonical linking rules: Forward versus reverse linking in normally developing and specifically language-impaired children. *Cognition*, 51:29–72.
- [Van Der Lely y Battell, 2003] Van Der Lely, H. y Battell, J. (2003). *Wh-Movement in Children with grammatical SLI: A test of the RDDR hypothesis*, páginas 153–181. The linguistic society of America, Washington, DC.
- [van der Lely y Ullman, 2001] van der Lely, H. y Ullman, M. (2001). Past tense morphology in specifically language impaired children and normally developing children. *Language and Cognitive Processes*, 16:245–290.
- [Van Meter et al., 1997] Van Meter, L., Fein, D., Morris, T., Waterhouse, L., y Allen, D. (1997). Delay versus deviance in autistic social behavior. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 27(5):557–569.
- [Walenski et al., 2009] Walenski, M., Sosta, K., Cappa, S., y Ullman, M. (2009). Deficits on irregular verbal morphology in italian-speaking alzheimer’s disease patients. *Neuropsychologia*, 47:1245–1255.
- [Wexler, 1990] Wexler, K. (1990). A review of john r. anderson’s language, memory and thought. *Cognition*, 6:327–351.
- [Wexler, 1994] Wexler, K. (1994). *Optional infinitives, head movement and the economy of derivations*, páginas 305–350. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [Wong et al., 2010] Wong, T., Cokely, E., y Schooler, L. (2010). An online database of ACT-R parameters: Towards a transparent community-based approach to model development. En *Proceedings fo ICCM - 2010 Tenth International Conference on Cognitive Modeling.*, páginas 282–286, Philadelphi, USA.
- [World Health Organization, 1993] World Health Organization (1993). The ICD-10 classification for mental and behavioural disorders: Diagnostic criteria for research.
- [World Health Organization, 2012] World Health Organization (2012). *Dementia. A public health priority*. WHO Press, Geneva, Switzerland.
- [Xu y Pinker, 1995] Xu, F. y Pinker, S. (1995). Weird past tense forms. *Journal of Child Language*, 22:531 – 556.

Apéndices

Paradigmas flexivos regulares del castellano

Tabla A.1: Paradigmas flexivos regulares del castellano en presente y pasado simple.

Conjugación	Número y persona	Presente simple indicativo	Pasado simple indicativo
1ª conjugación: <i>cantar</i> (to sing)	1ª singular	cant -o	cant -é
	2ª singular	cant -as	cant -aste
	3ª singular	cant -a	cant -ó
	1ª plural	cant -amos	cant -amos
	2ª plural	cant -áis	cant -asteis
	3ª plural	cant -an	cant -aron
2ª conjugación: <i>comer</i> (to eat)	1ª singular	com -o	com -í
	2ª singular	com -es	com -iste
	3ª singular	com -e	com -ió
	1ª plural	com -emos	com -imos
	2ª plural	com -éis	com -isteis
	3ª plural	com -en	com -ieron
3ª conjugación: <i>vivir</i> (to live)	1ª singular	viv -o	viv -í
	2ª singular	viv -es	viv -iste
	3ª singular	viv -e	viv -ió
	1ª plural	viv -imos	viv -imos
	2ª plural	viv -ís	viv -isteis
	3ª plural	viv -en	viv -ieron

Parámetros del modelo ACT-R

El modelo propuesto se ha implementado sobre la versión 6.0 de ACT-R. La tabla B.1 muestra los valores de los parámetros usados en las simulaciones del inglés y el castellano presentadas en este trabajo. Los mecanismos de *spreading activation*, *base level learning*, *optimized learning* y *procedural learning* se mantuvieron activos y con los valores por defecto para sus parámetros.

Tabla B.1: Parámetros utilizados para las simulaciones en Inglés y Castellano y valores promedio y desviaciones estándar para dichos parámetros en la base de datos de Wong et al. [2010].

		Castellano	Inglés	Promedio
Memoria declarativa	RT	-0.1	-0.1	$-0,02 \pm 0,62$
	BLL	0.32	0.29	$0,4 \pm 0,31$
	Ans	0.29	0.35	$0,43 \pm 0,34$
Memoria procedural	α	0.001	0.001	$0,2 \pm 0,03$
	EGS	0.19	0.21	$0,13 \pm 0,46$
Procesamiento gramatical	γ_m	0.1	0.1	-
	$\gamma_m - dec$	3	3	-
	Conj-PM	-2.8	-	-
	NP-PM	-3.6	-	-
	MTA-PM	-2.8	-3.2	-
Procesamiento fonológico	γ_f	0.08	0.12	-
	$\gamma_f - dec$	3	3	-
	FON-PM	4	4	-

Vocabulario de entrada al modelo

C.1. Vocabulario inglés

Tabla C.1: Vocabulario utilizado en los experimentos en inglés.

Forma	Reg.	Frec.	Forma	Reg.	Frec.	Forma	Reg.	Frec.
be	I	39175	call	R	627	play	R	333
have	I	12458	ask	R	612	pay	R	325
do	I	4367	turn	R	566	reach	R	324
say	I	2765	write	I	561	sit	I	314
make	I	2312	follow	R	540	carry	R	304
go	I	1844	keep	I	523	grow	I	300
take	I	1575	put	I	513	serve	R	300
come	I	1561	hold	I	509	pass	R	298
see	I	1513	work	R	496	like	R	294
get	I	1486	bring	I	488	add	R	291
know	I	1473	let	I	482	walk	R	287
give	I	1264	live	R	472	happen	R	278
find	I	1033	try	R	472	talk	R	275
use	R	1016	stand	I	468	lose	I	274
think	I	982	move	R	447	read	I	274
look	R	910	hear	I	433	wait	R	263
seem	R	831	run	I	431	open	R	259
tell	I	759	need	R	413	learn	R	254
leave	I	650	start	R	386	send	I	253
feel	I	643	mean	I	376	remember	R	250
show	R	640	help	R	352	build	I	249
want	R	631	believe	R	336	cut	I	245

Sigue en la página siguiente.

Forma	Reg.	Frec.	Forma	Reg.	Frec.	Forma	Reg.	Frec.
stop	R	240	point	R	143	belong	R	88
fall	I	239	end	R	140	check	R	88
place	R	233	answer	R	133	roll	R	88
break	I	228	feed	I	132	file	R	87
change	R	225	hang	I	131	cross	R	84
lie	I	224	marry	R	130	wash	R	83
draw	I	222	visit	R	129	press	R	82
allow	R	209	measure	R	128	sound	R	82
watch	R	209	hit	I	126	handle	R	81
cover	R	202	ride	I	126	organize	R	80
rise	I	199	listen	R	123	guess	R	77
stay	R	195	eat	I	122	match	R	77
spend	I	194	smile	R	122	rest	R	77
raise	R	188	save	R	121	shout	R	77
fill	R	184	finish	R	120	swing	I	77
die	R	183	sing	I	120	surprise	R	76
choose	I	177	forget	I	119	dry	R	72
close	R	174	wonder	R	119	light	I	72
wear	I	174	shoot	I	117	step	R	71
hope	R	164	fix	R	109	own	R	70
prepare	R	163	name	R	109	lift	R	69
recognize	R	163	care	R	108	manage	R	68
study	R	163	strike	I	108	promise	R	68
buy	I	162	shake	I	107	dress	R	67
wish	R	161	share	R	105	beat	I	66
act	R	159	burn	R	103	hate	R	66
drop	R	159	push	R	102	climb	R	65
win	I	159	sleep	I	97	count	R	65
fight	I	155	miss	R	95	cry	R	64
kill	R	153	paint	R	95	lock	R	63
teach	I	153	stare	R	95	hide	I	61
throw	I	150	drink	I	93	lean	R	61
catch	I	146	fly	I	92	park	R	61
love	R	145	touch	R	91	stretch	R	61
pull	R	145	laugh	R	89	cool	R	59

Sigue en la página siguiente.

Forma	Reg.	Frec.	Forma	Reg.	Frec.	Forma	Reg.	Frec.
clean	R	58	slide	I	43	spin	I	31
jump	R	58	smell	R	43	whisper	R	31
tear	I	58	aim	R	42	yell	R	31
back	R	57	trust	R	42	drill	R	30
meet	I	57	crack	R	41	fish	R	30
remind	R	57	mind	R	41	load	R	30
mix	R	56	drag	R	40	pray	R	30
swim	I	55	practice	R	40	race	R	30
disappear	R	54	scream	R	40	squeeze	R	30
sweep	I	54	ring	I	39	wave	R	30
freeze	I	53	steal	I	39	lend	I	29
print	R	53	stir	R	39	wind	I	29
blow	I	52	brush	R	38	bounce	R	28
hand	R	52	disturb	R	38	flash	R	28
frighten	R	51	heat	R	38	sigh	R	28
guide	R	51	land	R	38	switch	R	28
bend	I	50	snap	R	38	boil	R	27
cook	R	50	crawl	R	37	pretend	R	27
exercise	R	50	grab	R	37	bite	I	26
shut	I	50	march	R	37	bless	R	26
stick	I	50	matter	R	35	grind	I	26
tie	R	50	score	R	35	scare	R	26
invite	R	49	wipe	R	35	shop	R	26
last	R	48	kick	R	34	smoke	R	26
pour	R	48	rub	R	34	mail	R	25
knock	R	47	twist	R	34	bury	R	24
slip	R	47	sail	R	33	carve	R	23
bother	R	45	straighten		R	crash	R	23
dare	R	45	weigh	R	33	float	R	23
hurry	R	45	balance	R	32	shave	R	23
thank	R	45	dig	I	32	wrap	R	23
wake	I	45	melt	R	32	choke	R	22
attach	R	44	borrow	R	31	ruin	R	22
color	R	44	breathe	R	31	scratch	R	22
hunt	R	44	hurt	I	31	taste	R	22

Sigue en la página siguiente.

Forma	Reg.	Frec.	Forma	Reg.	Frec.	Forma	Reg.	Frec.
camp	R	20	lick	R	14	starve	R	10
fold	R	20	peel	R	14	trap	R	10
glue	R	20	punish	R	14	blast	R	9
polish	R	20	rain	R	14	bump	R	9
rock	R	20	rip	R	14	chop	R	9
swallow	R	20	spell	R	14	clap	R	9
fasten	R	19	spray	R	14	dust	R	9
obey	R	19	blink	R	13	hook	R	9
bleed	I	18	bow	R	13	spill	R	9
plant	R	18	fan	R	13	thread	R	9
sew	R	18	poke	R	13	tuck	R	9
shrug	R	18	rustle	R	13	wet	R	9
smash	R	18	sway	R	13	cough	R	8
soak	R	18	wreck	R	13	dodge	R	8
suck	R	18	decorate	R	12	flip	R	8
wink	R	18	empty	R	12	fry	R	8
crush	R	17	pat	R	12	iron	R	8
curl	R	17	pump	R	12	itch	R	8
pop	R	17	shrink	I	12	kid	R	8
repair	R	17	snow	R	12	paste	R	8
skip	R	17	tighten	R	12	tease	R	8
slap	R	17	type	R	12	blind	R	7
whirl	R	17	whistle	R	12	bomb	R	7
chew	R	16	ache	R	11	chase	R	7
murder	R	16	excuse	R	11	cheat	R	7
shove	R	16	hug	R	11	fetch	R	7
stamp	R	16	mock	R	11	hatch	R	7
steer	R	16	pinch	R	11	pin	R	7
trim	R	16	steam	R	11	sharpen	R	7
bake	R	15	bang	R	10	smack	R	7
screw	R	15	fool	R	10	splash	R	7
smooth	R	15	hop	R	10	string	I	7
dash	R	14	joke	R	10	tip	R	7
drip	R	14	sip	R	10	bubble	R	6
drown	R	14	sniff	R	10	copy	R	6

Sigue en la página siguiente.

Forma	Reg.	Frec.	Forma	Reg.	Frec.	Forma	Reg.	Frec.
holler	R	6	skate	R	3	chain	R	1
pardon	R	6	sneeze	R	3	dirty	R	1
plug	R	6	squeal	R	3	drool	R	1
rake	R	6	unscrew	R	3	fizz	R	1
rinse	R	6	untie	R	3	jabber	R	1
tangle	R	6	yawn	R	3	meow	R	1
trip	R	6	zoom	R	3	pee-pee	R	1
wobble	R	6	criss-cross	R	2	reattach	R	1
bob	R	5	hush	R	2	sharp	R	1
bust	R	5	juggle	R	2	spank	R	1
comb	R	5	nap	R	2	squoosh	R	1
erase	R	5	peep	R	2	staple	R	1
growl	R	5	shovel	R	2	swish	R	1
howl	R	5	squash	R	2	unbuckle	R	1
leak	R	5	squeak	R	2	unbutton	R	1
mess	R	5	squirt	R	2	unchain	R	1
perch	R	5	stab	R	2	unplug	R	1
row	R	5	tickle	R	2	untangle	R	1
scoop	R	5	trick	R	2	urinate	R	1
scoot	R	5	zip	R	2	wee-wee	R	1
ski	R	5	bark	R	1			
tick	R	5	chirp	R	1			
wiggle	R	5	dribble	R	1			
box	R	4	faint	R	1			
dial	R	4	pee	R	1			
hammer	R	4	pout	R	1			
mash	R	4	rope	R	1			
salute	R	4	scribble	R	1			
snuggle	R	4	smart	R	1			
wag	R	4	tape	R	1			
claw	R	3	bash	R	1			
clip	R	3	bop	R	1			
peek	R	3	bowl	R	1			
punch	R	3	burp	R	1			

C.2. Vocabulario castellano

Tabla C.2: Formas de presente simple utilizadas en los experimentos en castellano.

Forma	Regularidad Lexema	Regularidad Sufijo	Frecuencia	Número y Persona	Conj.
puede	I	R	19269	S3	er
va	I	I	15760	S3	ir
hace	R	R	15560	S3	er
se	I	I	12185	S1	er
dice	I	R	9494	S3	ir
vamos	I	I	8719	P1	ir
pueden	I	R	7297	P3	er
debe	R	R	6955	S3	er
van	I	I	6591	P3	ir
da	R	R	6189	S3	ar
sabe	R	R	5900	S3	er
quiero	I	R	5790	S1	er
quiere	I	R	5443	S3	er
digo	I	R	5347	S1	ir
puedo	I	R	4848	S1	er
mira	R	R	4258	S3	ar
camino	R	R	3943	S1	ar
viene	I	R	3418	S3	ir
ve	R	R	3415	S3	er
hacen	R	R	3402	P3	er
dicen	I	R	3086	P3	ir
podemos	R	R	2772	P1	er
vas	I	I	2652	S2	ir
sabes	R	R	2470	S2	er
juego	I	R	2410	S1	ar
veo	R	I	2373	S1	er
ayuda	R	R	2257	S3	ar
deben	R	R	2249	P3	er
dan	R	R	2194	P3	ar
sale	R	R	2138	S3	ir
espera	R	R	2068	S3	ar

Sigue en la página siguiente.

Forma	Regularidad Lexema	Regularidad Sufijo	Frecuencia	Número y Persona	Conj.
siento	I	R	1998	S1	ir
pone	R	R	1957	S3	er
quieren	I	R	1804	P3	er
ves	R	R	1697	S2	er
saben	R	R	1665	P3	er
busca	R	R	1622	S3	ar
entra	R	R	1555	S3	ar
ven	R	R	1507	P3	er
quieres	I	R	1461	S2	er
siente	I	R	1400	S3	ir
cocina	R	R	1376	S3	ar
sabemos	R	R	1361	P1	er
puedes	I	R	1359	S2	er
hago	I	R	1344	S1	er
queremos	R	R	1338	P1	er
debo	R	R	1247	S1	er
vienen	I	R	1235	P3	ir
acaba	R	R	1197	S3	ar
debemos	R	R	1109	P1	er
abre	R	R	1100	S3	ir
espero	R	R	1098	S1	ar
dices	I	R	925	S2	ir
hacemos	R	R	890	P1	er
toca	R	R	888	S3	ar
vemos	R	R	887	P1	er
corto	R	R	882	S1	ar
grito	R	R	880	S1	ar
cae	R	R	869	S3	er
canto	R	R	832	S1	ar
corta	R	R	822	S3	ar
ponen	R	R	786	P3	er
doy	R	I	785	S1	ar
salen	R	R	783	P3	ir
trae	R	R	727	S3	er

Sigue en la página siguiente.

Forma	Regularidad Lexema	Regularidad Sufijo	Frecuencia	Número y Persona	Conj.
corre	R	R	686	S3	er
compra	R	R	672	S3	ar
salto	R	R	619	S1	ar
lee	R	R	615	S3	er
beso	R	R	600	S1	ar
dibujo	R	R	598	S1	ar
das	R	R	572	S2	ar
regalo	R	R	572	S1	ar
haces	R	R	564	S2	er
entran	R	R	520	P3	ar
pongo	R	I	512	S1	er
cierra	I	R	489	S3	ar
juega	I	R	475	S3	ar
miran	R	R	472	P3	ar
vengo	R	I	457	S1	ir
canta	R	R	435	S3	ar
grita	R	R	421	S3	ar
leo	R	R	406	S1	er
come	R	R	403	S3	er
esperan	R	R	399	P3	ar
buscan	R	R	392	P3	ar
decimos	R	R	388	P1	ir
llora	R	R	378	S3	ar
camina	R	R	363	S3	ar
acabo	R	R	356	S1	ar
acaban	R	R	346	P3	ar
duerme	I	R	345	S3	ir
caen	R	R	342	P3	er
debes	R	R	342	S2	er
saludo	R	R	337	S1	ar
esperamos	R	R	333	P1	ar
sienten	I	R	322	P3	ir
miro	R	R	321	S1	ar
salimos	R	R	321	P1	ir

Sigue en la página siguiente.

Forma	Regularidad Lexema	Regularidad Sufijo	Frecuencia	Número y Persona	Conj.
abren	R	R	318	P3	ir
traen	R	R	308	P3	er
damos	R	R	287	P1	ar
rompe	R	R	275	S3	er
compras	R	R	263	S2	ar
cortas	R	R	257	S2	ar
salta	R	R	252	S3	ar
corren	R	R	250	P3	er
comen	R	R	244	P3	er
salgo	R	I	238	S1	ir
sentimos	R	R	238	P1	ir
busco	R	R	224	S1	ar
sales	R	R	222	S2	ir
entramos	R	R	214	P1	ar
ayudas	R	R	213	S2	ar
tocan	R	R	212	P3	ar
venimos	R	R	212	P1	ir
voy	I	I	210	S1	ir
traigo	R	I	209	S1	er
juegan	I	R	201	P3	ar
esconde	R	R	195	S3	er
sientes	I	R	192	S2	ir
pones	R	R	185	S2	er
cantan	R	R	183	P3	ar
ponemos	R	R	183	P1	er
besa	R	R	177	S3	ar
miras	R	R	173	S2	ar
vienes	I	R	171	S2	ir
ayudan	R	R	164	P3	ar
lava	R	R	162	S3	ar
soplo	R	R	150	S1	ar
acabamos	R	R	148	P1	ar
baila	R	R	143	S3	ar
cierran	I	R	140	P3	ar

Sigue en la página siguiente.

Forma	Regularidad Lexema	Regularidad Sufijo	Frecuencia	Número y Persona	Conj.
abro	R	R	140	S1	ir
toco	R	R	135	S1	ar
compran	R	R	133	P3	ar
leen	R	R	128	P3	er
cierro	I	R	120	S1	ar
saluda	R	R	118	S3	ar
buscamos	R	R	117	P1	ar
compro	R	R	115	S1	ar
entro	R	R	115	S1	ar
duermen	I	R	114	P3	ir
corro	R	R	114	S1	er
caminan	R	R	113	P3	ar
miramos	R	R	107	P1	ar
sopla	R	R	106	S3	ar
gritan	R	R	101	P3	ar
dibuja	R	R	97	S3	ar
rompen	R	R	96	P3	er
compramos	R	R	95	P1	ar
bailan	R	R	93	P3	ar
esperas	R	R	92	S2	ar
lloran	R	R	92	P3	ar
saltan	R	R	90	P3	ar
caigo	R	I	88	S1	er
duermo	I	R	87	S1	ir
caminamos	R	R	87	P1	ar
lloro	R	R	83	S1	ar
prende	R	R	83	S3	er
cortan	R	R	75	P3	ar
prendes	R	R	75	S2	er
acabas	R	R	70	S2	ar
muerde	I	R	68	S3	er
regala	R	R	68	S3	ar
jugamos	R	R	63	P1	ar
lees	R	R	62	S2	er

Sigue en la página siguiente.

Forma	Regularidad Lexema	Regularidad Sufijo	Frecuencia	Número y Persona	Conj.
esconden	R	R	59	P3	er
comemos	R	R	56	P1	er
leemos	R	R	55	P1	er
traemos	R	R	53	P1	er
abrimos	R	R	50	P1	ir
buscas	R	R	49	S2	ar
cocinas	R	R	49	S2	ar
traes	R	R	49	S2	er
ayudo	R	R	48	S1	ar
regalan	R	R	45	P3	ar
entras	R	R	44	S2	ar
besan	R	R	43	P3	ar
dormimos	R	R	41	P1	ir
saludan	R	R	41	P3	ar
lavan	R	R	38	P3	ar
comes	R	R	37	S2	er
soplan	R	R	37	P3	ar
abres	R	R	36	S2	ir
ayudamos	R	R	36	P1	ar
tocamos	R	R	35	P1	ar
rompo	R	R	34	S1	er
tocas	R	R	34	S2	ar
nadan	R	R	32	P3	ar
dibujan	R	R	30	P3	ar
cerramos	R	R	29	P1	ar
prenden	R	R	29	P3	er
bailamos	R	R	28	P1	ar
corremos	R	R	28	P1	er
nado	R	R	28	S1	ar
peina	R	R	26	S3	ar
muerden	I	R	25	P3	er
lavo	R	R	25	S1	ar
saludamos	R	R	24	P1	ar
lloras	R	R	23	S2	ar

Sigue en la página siguiente.

Forma	Regularidad Lexema	Regularidad Sufijo	Frecuencia	Número y Persona	Conj.
bailo	R	R	22	S1	ar
caes	R	R	22	S2	er
cantas	R	R	22	S2	ar
corres	R	R	22	S2	er
lloramos	R	R	22	P1	ar
prendo	R	R	22	S1	er
caminas	R	R	21	S2	ar
cortamos	R	R	21	P1	ar
cierras	I	R	20	S2	ar
cantamos	R	R	20	P1	ar
escondo	R	R	20	S1	er
caemos	R	R	19	P1	er
juegas	I	R	18	S2	ar
besamos	R	R	18	P1	ar
escondes	R	R	17	S2	er
cocino	R	R	14	S1	ar
cocinan	R	R	13	P3	ar
regalamos	R	R	13	P1	ar
regalas	R	R	13	S2	ar
duermes	I	R	12	S2	ir
muerdo	I	R	11	S1	er
rompemos	R	R	11	P1	er
gritas	R	R	10	S2	ar
lavas	R	R	10	S2	ar
besas	R	R	8	S2	ar
rompes	R	R	8	S2	er
gritamos	R	R	7	P1	ar
saltamos	R	R	7	P1	ar
nadas	R	R	6	S2	ar
peinan	R	R	6	P3	ar
peino	R	R	5	S1	ar
prendemos	R	R	5	P1	er
saltas	R	R	5	S2	ar
lavamos	R	R	4	P1	ar

Sigue en la página siguiente.

Forma	Regularidad Lexema	Regularidad Sufijo	Frecuencia	Número y Persona	Conj.
mordemos	R	R	4	P1	er
saludas	R	R	4	S2	ar
muerdes	I	R	3	S2	er
cocinamos	R	R	3	P1	ar
dibujamos	R	R	3	P1	ar
escondemos	R	R	3	P1	er
bailas	R	R	2	S2	ar
nadamos	R	R	2	P1	ar
peinamos	R	R	2	P1	ar
dibujas	R	R	1	S2	ar
peinas	R	R	0	S2	ar
soplamos	R	R	0	P1	ar
soplas	R	R	0	S2	ar

Tabla C.3: Formas de pasado simple utilizadas en los experimentos en castellano.

Forma	Regularidad Lexema	Regularidad Sufijo	Frecuencia	Número y Persona	Conj.
dijo	I	I	9065	S3	er
hizo	I	I	6919	S3	er
dio	I	I	4484	S3	ar
dije	I	I	3755	S1	er
ví	R	R	2863	S1	er
vino	I	I	2855	S3	ir
pudo	I	I	2667	S3	er
puso	I	I	2437	S3	er
hicieron	I	R	2152	P3	er
miró	R	R	2036	S3	ar
salió	R	R	1927	S3	ir
hice	I	I	1706	S1	er
sintió	I	R	1559	S3	ir
quiso	I	I	1399	S3	er
di	I	I	1356	S1	ar

Sigue en la página siguiente.

Forma	Regularidad Lexema	Regularidad Sufijo	Frecuencia	Número y Persona	Conj.
dieron	I	I	1318	P3	ar
abrió	R	R	1251	S3	ir
pude	I	I	1202	S1	er
entró	R	R	1172	S3	ar
traje	I	I	1092	S1	er
dijeron	I	I	1061	P3	er
sentí	R	R	1039	S1	ir
supo	I	I	1024	S3	er
cayó	R	R	1011	S3	er
acabó	R	R	923	S3	ar
vieron	R	R	727	P3	er
quise	I	I	702	S1	er
debió	R	R	687	S3	er
gritó	R	R	656	S3	ar
puse	I	I	637	S1	er
hicimos	I	R	637	P1	er
pudieron	I	R	612	P3	er
trajo	I	I	611	S3	er
pusieron	I	R	606	P3	er
tocó	R	R	597	S3	ar
salí	R	R	561	S1	ir
cerró	R	R	550	S3	ar
viste	R	R	545	S2	er
salieron	R	R	497	P3	ir
supe	I	I	489	S1	er
dijiste	I	R	469	S2	er
miré	R	R	462	S1	ar
vinieron	I	R	461	P3	ir
vió	R	R	458	S3	er
vimos	R	R	433	P1	er
corrió	R	R	432	S3	er
buscó	R	R	431	S3	ar
entré	R	R	397	S1	ar
vine	I	I	377	S1	ir

Sigue en la página siguiente.

Forma	Regularidad Lexema	Regularidad Sufijo	Frecuencia	Número y Persona	Conj.
entraron	R	R	377	P3	ar
hiciste	I	R	350	S2	er
ayudó	R	R	327	S3	ar
compró	R	R	311	S3	ar
rompió	R	R	307	S3	er
esperó	R	R	281	S3	ar
leí	R	R	275	S1	er
caminó	R	R	255	S3	ar
pudimos	I	R	251	P1	er
miraron	R	R	249	P3	ar
leyó	R	R	248	S3	er
abrí	R	R	247	S1	ir
acabaron	R	R	241	P3	ar
cortó	R	R	239	S3	ar
saltó	R	R	234	S3	ar
regaló	R	R	225	S3	ar
abrieron	R	R	220	P3	ir
dijimos	I	R	219	P1	er
dimos	I	I	210	P1	ar
trajeron	I	I	209	P3	er
cayeron	R	R	209	P3	er
saludó	R	R	207	S3	ar
quisieron	I	R	194	P3	er
compré	R	R	182	S1	ar
besó	R	R	174	S3	ar
durmió	I	R	173	S3	ir
lloró	R	R	171	S3	ar
debieron	R	R	168	P3	er
busqué	R	R	165	S1	ar
comió	R	R	155	S3	er
corrieron	R	R	141	P3	er
debí	R	R	140	S1	er
caminé	R	R	139	S1	ar
cantó	R	R	139	S3	ar

Sigue en la página siguiente.

Forma	Regularidad Lexema	Regularidad Sufijo	Frecuencia	Número y Persona	Conj.
caí	R	R	137	S1	er
corrí	R	R	137	S1	er
esperé	R	R	135	S1	ar
buscaron	R	R	131	P3	ar
jugó	R	R	125	S3	ar
diste	I	I	122	S2	ar
pusimos	I	R	120	P1	er
supieron	I	R	113	P3	er
sintieron	I	R	111	P3	ir
cerraron	R	R	110	P3	ar
ayudaron	R	R	100	P3	ar
grité	R	R	97	S1	ar
cerré	R	R	96	S1	ar
dormí	R	R	96	S1	ir
supimos	I	R	95	P1	er
compraron	R	R	95	P3	ar
toqué	R	R	94	S1	ar
lloré	R	R	89	S1	ar
prendió	R	R	85	S3	er
pudiste	I	R	82	S2	er
comí	R	R	81	S1	er
tocaron	R	R	78	P3	ar
viniste	I	R	77	S2	ir
vinimos	I	R	76	P1	ir
escondió	R	R	76	S3	er
rompieron	R	R	76	P3	er
quisiste	I	R	72	S2	er
cortaron	R	R	70	P3	ar
comieron	R	R	68	P3	er
caminaron	R	R	65	P3	ar
mordió	R	R	65	S3	er
pusiste	I	R	64	S2	er
gritaron	R	R	64	P3	ar
saltaron	R	R	63	P3	ar

Sigue en la página siguiente.

Forma	Regularidad Lexema	Regularidad Sufijo	Frecuencia	Número y Persona	Conj.
trajiste	I	R	61	S2	er
comimos	R	R	61	P1	er
quisimos	I	R	60	P1	er
besé	R	R	56	S1	ar
jugaron	R	R	56	P3	ar
lavó	R	R	53	S3	ar
leíste	R	R	53	S2	er
regalaron	R	R	53	P3	ar
acabé	R	R	51	S1	ar
saludé	R	R	50	S1	ar
bailó	R	R	45	S3	ar
corté	R	R	42	S1	ar
saliste	R	R	42	S2	ir
dibujó	R	R	40	S3	ar
regalé	R	R	40	S1	ar
rompí	R	R	38	S1	er
supiste	I	R	37	S2	er
esperaron	R	R	37	P3	ar
prendieron	R	R	37	P3	er
salté	R	R	37	S1	ar
durmieron	I	R	36	P3	ir
cantaron	R	R	35	P3	ar
ayudé	R	R	32	S1	ar
canté	R	R	32	S1	ar
entraste	R	R	32	S2	ar
lavé	R	R	32	S1	ar
prendí	R	R	32	S1	er
jugué	R	R	31	S1	ar
corrimos	R	R	31	P1	er
trajimos	I	R	30	P1	er
besaron	R	R	29	P3	ar
saludaron	R	R	29	P3	ar
leyeron	R	R	28	P3	er
sopló	R	R	28	S3	ar

Sigue en la página siguiente.

Forma	Regularidad Lexema	Regularidad Sufijo	Frecuencia	Número y Persona	Conj.
bailaron	R	R	27	P3	ar
compraste	R	R	27	S2	ar
debiste	R	R	27	S2	er
caímos	R	R	26	P1	er
debimos	R	R	25	P1	er
escondí	R	R	24	S1	er
lloraron	R	R	23	P3	ar
sentiste	R	R	21	S2	ir
dormiste	R	R	18	S2	ir
leímos	R	R	18	P1	er
peinó	R	R	18	S3	ar
tocaste	R	R	18	S2	ar
buscaste	R	R	17	S2	ar
caíste	R	R	16	S2	er
abriste	R	R	15	S2	ir
comiste	R	R	15	S2	er
mordí	R	R	15	S1	er
escondieron	R	R	14	P3	er
lavarón	R	R	13	P3	ar
regalaste	R	R	13	S2	ar
ayudaste	R	R	11	S2	ar
besaste	R	R	10	S2	ar
cocinó	R	R	10	S3	ar
acabaste	R	R	9	S2	ar
dibujaron	R	R	9	P3	ar
miraste	R	R	9	S2	ar
soplaron	R	R	9	P3	ar
bailé	R	R	8	S1	ar
escondiste	R	R	8	S2	er
jugaste	R	R	8	S2	ar
cerraste	R	R	7	S2	ar
nadó	R	R	7	S3	ar
rompimos	R	R	7	P1	er
cocinaron	R	R	6	P3	ar

Sigue en la página siguiente.

Forma	Regularidad Lexema	Regularidad Sufijo	Frecuencia	Número y Persona	Conj.
gritaste	R	R	6	S2	ar
mordieron	R	R	6	P3	er
bailaste	R	R	5	S2	ar
corriste	R	R	5	S2	er
cortaste	R	R	5	S2	ar
peiné	R	R	5	S1	ar
cantaste	R	R	4	S2	ar
cociné	R	R	4	S1	ar
lavaste	R	R	4	S2	ar
lloraste	R	R	4	S2	ar
prendimos	R	R	4	P1	er
saltaste	R	R	4	S2	ar
cocinaste	R	R	3	S2	ar
dibujé	R	R	3	S1	ar
esperaste	R	R	3	S2	ar
peinaron	R	R	3	P3	ar
prendiste	R	R	3	S2	er
rompiste	R	R	3	S2	er
soplé	R	R	3	S1	ar
escondimos	R	R	2	P1	er
nadaron	R	R	2	P3	ar
caminaste	R	R	1	S2	ar
mordiste	R	R	1	S2	er
nadaste	R	R	1	S2	ar
nadé	R	R	1	S1	ar
dibujaste	R	R	0	S2	ar
mordimos	R	R	0	P1	er
peinaste	R	R	0	S2	ar
saludaste	R	R	0	S2	ar
soplaste	R	R	0	S2	ar

Apéndice D

Morfología verbal en pacientes con posible Alzheimer: Materiales

Presente verbos regulares

A mí me gusta bailar tango.

Así que todos los días _____ un tango.

A mí me gusta cocinar pescado al horno.

Así que todos los días _____ pescado al horno.

A mí me encanta comprar cuadros.

Así que siempre que puedo _____ cuadros.

A mí me encanta escuchar canciones populares.

Así que cada día _____ canciones populares.

A mí me encanta saltar en paracaídas.

Así que cada semana _____ en paracaídas.

A mí me gusta muchísimo hablar con mi padre.

Así que todos los días _____ con mi padre.

A mí me gusta reparar mi propio coche.

Así que siempre que se estropea _____ mi propio coche.

A mí me gusta descansar después de comer.

Así que todos los días _____ después de comer.

A mí me encanta trabajar por la tarde.

Así que siempre _____ por la tarde.

A mí me gusta afrontar los problemas.

Así que siempre _____ los problemas.

A mí me gusta mucho besar a mi perro.

Así que todos los días _____ a mi perro.

A mí me encanta caminar por la playa.

Así que todos los días _____ por la playa.

A mí me encanta lavar mi coche.

Así que todas las semanas _____ mi coche.

A mí me gusta buscar los libros en la biblioteca.

Así que siempre _____ los libros en la biblioteca.

A mí me gusta llevar pantalones vaqueros.

Así que todos los días _____ pantalones vaqueros.

A mí me gusta mucho usar mi nueva cocina.

Así que cada día _____ mi nueva cocina.

A mí me gusta mandar cartas a mis amigos.

Así que cada mes _____ cartas a mis amigos.

A mí me gusta inventar historietas.

Así que cada día _____ una historieta nueva.

A mí me gusta cenar ensalada.

Así que cada día _____ ensalada.

A mí me gusta comer temprano.

Así que siempre _____ temprano.

Presente verbos irregulares

A mí me gusta servir café a mi jefe.

Así que siempre _____ café a mi jefe.

A mí me gusta competir con mis amigos.

Así que cada semana _____ con mis amigos.

A mí me gusta sonreír al saludar.

Así que siempre _____ al saludar.

A mí me gusta freír los calamares.

Así que siempre _____ los calamares.

A mí me encanta deducir la solución yo solo.

Así que siempre _____ la solución yo solo.

A mí me gusta corregir los exámenes.

Así que siempre _____ los exámenes.

A mí me gusta elegir los productos que compro.

Así que siempre _____ los productos que compro.

A mí me gusta ir siempre el primero.

Así que siempre _____ el primero.

A mí me gusta medir la altura de mi hijo.

Así que cada semana _____ la altura de mi hijo.

A mí me gusta bendecir la mesa.

Así que cada día _____ la mesa.

A mí me gusta traer madalenas al trabajo.

Así que cada día _____ madalenas al trabajo.

A mí me encanta perseguir gatos.

Así que siempre _____ a los gatos.

A mí me gusta vestir a mi perrito.

Así que cada día _____ a mi perrito.

A mí no me gusta mentir a mis padres.

Así que nunca _____ a mis padres.

A mí me gusta seducir a chicos jóvenes.

Así que siempre _____ a chicos jóvenes.

A mí me encanta poner notes.

Así que siempre _____ notes.

A mí me gusta conducir despacio.

Así que siempre _____ despacio.

A mí me gusta saber cómo actuar.

Así que siempre _____ cómo actuar.

A mí me gusta venir puntual al trabajo.

Así que siempre _____ puntual al trabajo.

A mí me gusta pedir mi comida.

Así que cada día _____ mi comida.

Pasado verbos regulares

A Ramón le encanta lavar su coche.

Así que ayer Ramón _____ su coche.

A Pedro le gusta bailar tango.

Así que Pedro ayer _____ un tango.

A Juan le gusta afrontar los problemas.

Así que ayer Juan _____ un problema.

A Jorge le encanta escuchar boleros.

Así que ayer Jorge _____ varios boleros.

A Jesús le encanta caminar por la montaña.

Así que ayer Jesús _____ por la montaña.

A Elena le gusta cenar pescado.

Así que ayer Elena _____ pescado.

A José le gusta inventar aparatos nuevos.

Así que ayer José _____ un aparato nuevo.

A Leonor le encanta trabajar por la tarde.

Así que ayer Leonor _____ por la tarde.

A Juan le gusta saltar en paracaídas.

Así que ayer Juan _____ en paracaídas.

A Lorena le gusta cocinar pescado al horno.

Así que ayer Lorena _____ pescado al horno.

A Marina le gusta descansar después de comer.

Así que ayer Marina _____ después de comer.

A Lucía le gusta buscar ofertas.

Así que ayer Lucía _____ varias ofertas.

A Alberto le gusta llevar su jersey rojo.

Así que ayer Alberto _____ su jersey rojo.

A Francisco le gusta mandar a su secretaria a por café.

Así que ayer Francisco _____ a su secretaria a por café.

A Javi le gusta usar su nueva cocina.

Así que ayer Javi _____ su nueva cocina.

A Paula le gusta comer temprano.

Así que ayer Paula _____ temprano.

A Irene le gusta hablar con su madre.

Así que ayer Irene _____ con su madre.

A Álvaro le gusta reparar su propio coche.

Así que ayer Álvaro _____ su propio coche.

A Marcos le encanta comprar cuadros.

Así que ayer Marcos _____ dos cuadros.

A María le gusta mucho besar a su perro.

Así que ayer María _____ a su perro.

Pasado verbos irregulares

A Irene le gusta elegir los productos.

Así que Irene ayer _____ los productos.

A Marcos le gusta conducir por las noches.

Así que ayer Marcos _____ por la noche.

A Jorge le gusta medir la altura de su hijo.

Así que ayer Jorge _____ la altura de su hijo.

A Lucía le gusta venir puntual al trabajo.

Así que ayer Lucía _____ puntual al trabajo.

A Pedro le encanta perseguir gatos.

Así que ayer Pedro _____ un gato.

A Ana le gusta seducir a chicos jóvenes.

Así que Ana ayer _____ a un chico joven.

A Juana le gusta vestir a su perrito.

Así que Juana ayer _____ a su perrito.

A Ana le encanta poner cortinas.

Así que ayer Ana _____ las cortinas.

A José le gusta mentir a sus padres.

Así que ayer José _____ a sus padres.

A Mario le gusta servir café a su jefe.

Así que Mario ayer _____ café a su jefe.

A Juan le gusta sonreír al saludar.

Así que ayer Juan me _____ al saludar.

A Marta le gusta corregir los exámenes.

Así que Marta ayer _____ los exámenes.

A Javi le gusta saber cómo actuar.

Así que ayer Javi _____ cómo actuar.

A Ramón le gusta competir con sus amigos.

Así que ayer Ramón _____ con sus amigos.

A Amparo le gusta bendecir la mesa.

Así que ayer Amparo _____ la mesa.

A Elena le gusta traer madalenas al trabajo.

Así que ayer Elena _____ madalenas al trabajo.

A Luis le gusta pedir su comida.

Así que ayer Luis _____ su comida.

A Pedro le gusta ir siempre el primero.

Así que ayer Pedro _____ el primero.

A Alberto le encanta deducir la solución él solo.

Así que ayer Alberto _____ la solución él solo.

A Lorena le gusta freír los calamares.

Así que ayer Lorena _____ los calamares.

